

2. Einführung in die Technische Keramik

2.1 Technische Keramik

Interessante Werkstoffe für vielfältige Anwendungen Ein Überblick

- Dr. Peter Stingl
CeramTec AG
Lauf a. d. Pegnitz

Die Folien finden Sie ab Seite 54.

2.1.1. Einleitung

Technischer Fortschritt ist ohne die Neu- oder Weiterentwicklung von Werkstoffen nicht mehr denkbar; somit kommt den Werkstoffen bei allen technischen Prozessen heute eine Schlüsselfunktion zu.

Im Verlauf der letzten 10-20 Jahre wurden neue keramische Werkstoffe entwickelt, welche durch ihr spezielles Eigenschaftsprofil in zahlreichen Bereichen der Technik Anwendung gefunden haben. Überall dort, wo mit Metallen oder Kunststoffen Probleme im Zusammenhang mit z.B. Warmfestigkeit, chemischen oder mechanischen Verschleiß bestehen, sind die Anwendungsgebiete der so genannten Hochleistungskeramik.

Hochleistungskeramik ist in DIN V ENV 12212 definiert als „hoch entwickelter, hochleistungsfähiger keramischer Werkstoff, der überwiegend nichtmetallisch und anorganisch ist und über bestimmte zweckmäßige Eigenschaften verfügt“. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff "Hochleistungskeramik" oft als Sammelbegriff für alle keramischen Werkstoffe auf oxidischer, nitridischer, karbidischer oder boridischer Basis mit einer definierten Zusammensetzung und einem für eine bestimmte Anwendung optimiertem Gefüge und Eigenschaftsprofil zur Abgrenzung zu traditioneller Keramik auf Tonbasis verwendet. Hochentwickelte silicatische Werkstoffe wie Steatit fallen je nach Verständnis der einzelnen Hersteller darunter.

Einführung

Hochleistungskeramiken gelten nicht nur als Hoffnungsträger für zukünftige High-Tech-Anwendungen. Vielmehr haben sie sich mittlerweile in vielen Bereichen der Technik etabliert und Innovationen im Maschinenbau der Medizintechnik, im Automobilbereich bis hin zur Mikroelektronik ermöglicht.

2.1.2. Definitionen; Nomenklatur

Die Bezeichnung "Keramik" leitet sich von dem griechischen Wort Keramos = Erden ab.

Unter dem Begriff "Keramik" versteht man, ganz allgemein gesehen, nichtmetallische anorganische Werkstoffe. Ihre Palette reicht von den klassischen Töpferwaren und Porzellanen bis zu den modernen Hochleistungskeramiken.

Bild 1 zeigt in einer Übersicht die Einordnung der Keramik im Spektrum der organischen und anorganischen Werkstoffe.



Bild 1: Einteilung der Werkstoffe

Zu den **keramischen Hochleistungswerkstoffen** zählen **nichtmetallische anorganische Werkstoffe**, die im wesentlichen aus anorganischen, meist synthetischen Pulvern, mit eng definierter

chemischer Zusammensetzung und Teilchencharakteristik, hergestellt werden.

Die Klassifikation der Keramik hat sich systematisch entwickelt. Mit den früher gebräuchlichen Einteilungskategorien wie Grob- und Feinkeramik oder dichter bzw. poröser Scherben kann die heutige Werkstoffpalette bei weitem nicht mehr abgedeckt werden.

Keramische Werkstoffe

sind anorganisch und nichtmetallisch.
In der Regel werden sie bei Raumtemperatur aus einer Rohmasse geformt und erhalten ihre typischen Werkstoffeigenschaften durch einen Sintervorgang bei hohen Temperaturen.

Ceramics

umfasst im angelsächsischen Sprachgebrauch zusätzlich auch Glas, Email, Glaskeramik und organische Bindemittel.

Feinkeramik

weist Gefügebestandteilen $< 0,1\text{mm}$ auf, darüber spricht man von Grobkeramik

Bild 2: Definitionen

Die **Technische Keramik** umfasst in erster Linie keramische Werkstoffe und Produkte für technische Anwendungen. Applikationen im Bereich der Konsumgüter nehmen ebenfalls zu, sind aber vom Marktvolumen eher unbedeutend.

Bild 3 zeigt in einer Übersicht die wichtigsten keramischen Hochleistungs-Werkstoffe und ihre Anwendungsfelder sowie entsprechende Applikationsbeispiele.

Da jedoch damit keine eindeutige Klassifizierung möglich ist, werden die Werkstoffe alternativ entsprechend ihrer mineralogischen bzw. chemischen Zusammensetzung gegliedert.

Zu den Werkstoffen der Technischen Keramik gehören die folgenden Gruppen: Silikatkeramik, Oxidkeramik und Nichtoxidkeramik. Weitere Informationen hierzu finden sich unter Punkt 2.1.6.

Einführung

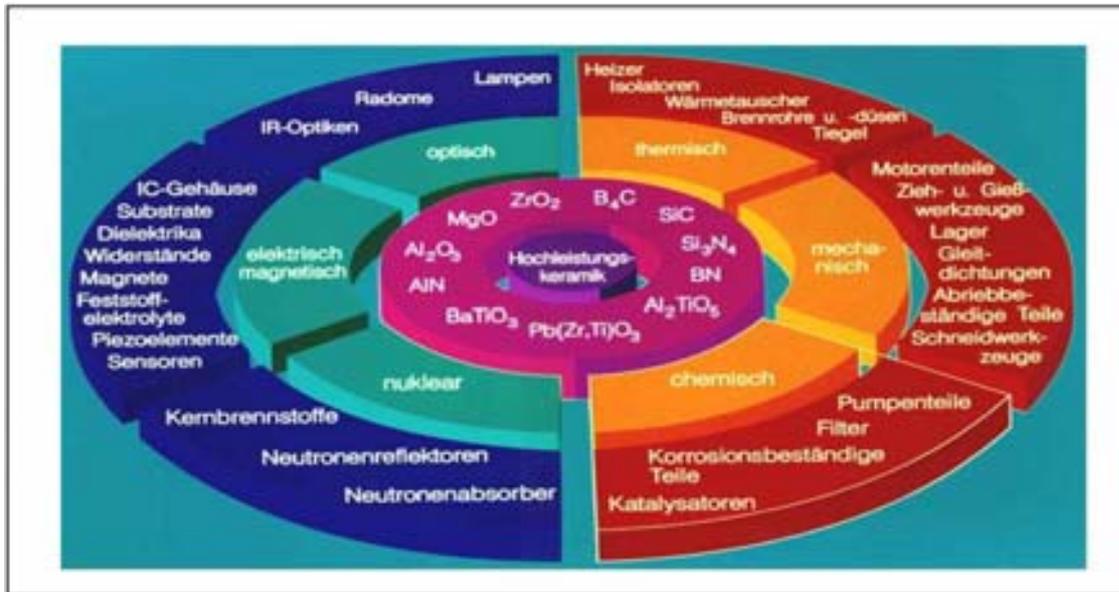


Bild 3: Keramische Werkstoffe und Anwendungsfelder

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass sich die Mehrzahl dieser Werkstoffe in der Wachstumsphase des Produktlebenszyklusses befindet.

2.1.3. Wirtschaftliche Aspekte, Markt

Hochleistungskeramik gilt als eine der Schlüsseltechnologien für die nächsten Jahrzehnte. Weltweit wird mit großer Intensität an der Weiterentwicklung solcher Werkstoffe gearbeitet, wobei insbesondere in Europa, USA und Japan in großem Umfang anwendungsbezogene Projekte durchgeführt werden.

Aufgrund der zunehmenden Investitionsbereitschaft sowohl bei Pulver- als auch Keramikherstellern kann abgeleitet werden, dass der Keramik für die Zukunft eine große marktstrategische Bedeutung beigemessen wird. Zurzeit hat die technische Keramik am Gesamtmarkt "Keramik" der westlichen Welt lediglich einen Anteil von ca. 30 % (davon > 2/3 Elektronik). Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich in Anwendungen, wo die speziellen Stärken der Keramik konsequent genutzt werden, die Märkte der Zukunft entwickeln. Der Markt für technische Keramik nimmt kontinuierlich zu (Bild 4). Die jährlichen Wachstumsraten liegen im Bereich von ca. 6-8 %.

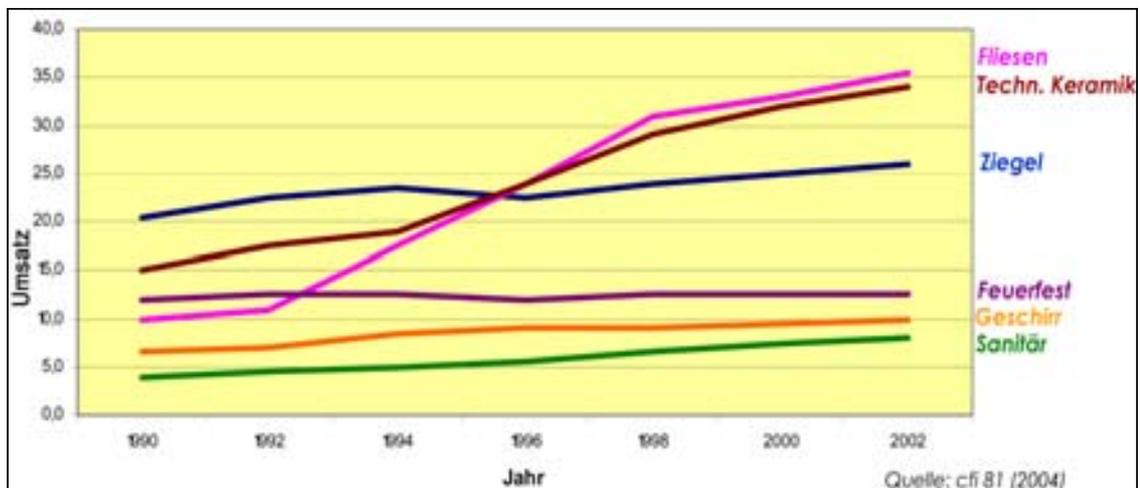


Bild 4: Entwicklung der Umsätze bei Keramik (weltweit, in Mrd. €)

2.1.4. Die wichtigsten Herstellungsrouten



Bild 5: Wesentliche Verfahrensschritte zur Herstellung von Keramik

In der im Vergleich zu Metallen anderen Vorgehensweise bei der Herstellung von Keramik liegen die entscheidenden Unterschiede und daraus resultierend, gewisse Beschränkungen in der Formenvielfalt sowie bei den Form- und Maßtoleranzen. Grundsätzlich ist die Her-

Einführung

stellung keramischer Bauteile den in der Pulvermetallurgie üblichen Routen sehr ähnlich. Die wesentlichen Verfahrensschritte zeigt Bild 5.

2.1.4.1. Ausgangspulver, Rohstoffe

- Rohstoff(e)
 - Reinheit
 - Korngröße
 - Spez. Oberfläche
- Sinterhilfsmittel
- Verflüssigungsmittel
- Plastifizierungsmittel
- Verfestigungsmittel



Bild 6: Rohstoffe und Additive

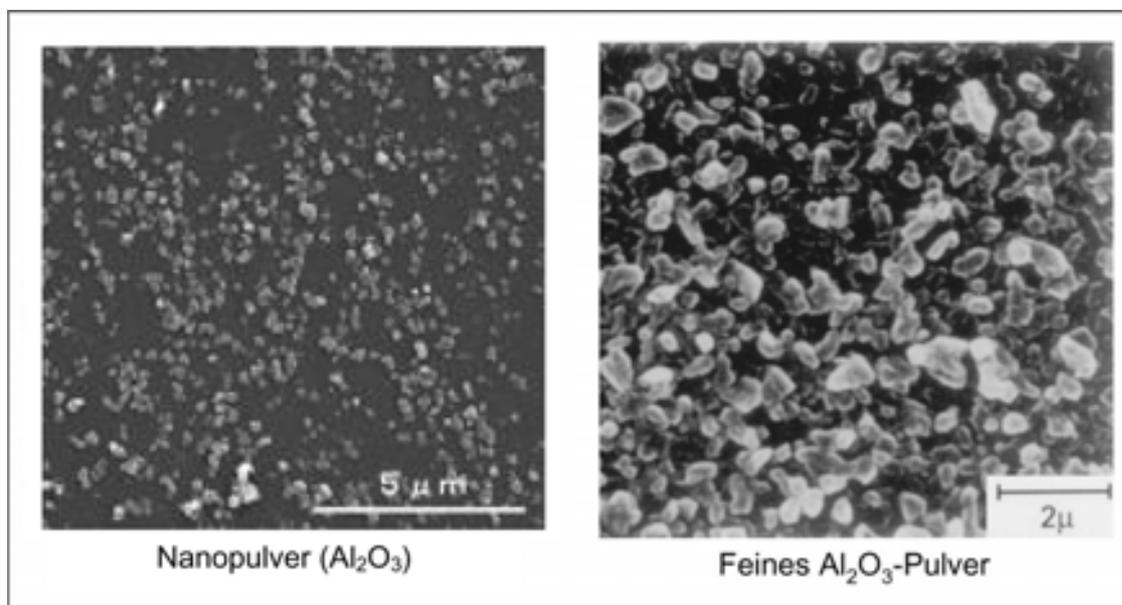


Bild 7: Aluminiumoxidpulver

Silikatkeramik, wie z. B. Porzellan, wird überwiegend aus Naturprodukten wie Kaolin, Ton, Feldspat, Quarzsand usw. hergestellt. Rohstoffbasis für Oxid- und Nichtoxidkeramik sind dagegen im Allgemeinen hochreine, feindisperse Oxide, Nitride, Boride und Carbide mit

genau spezifizierter chemischer Zusammensetzung und Teilchenmorphologie. Die dafür notwendigen Pulver müssen i. a. synthetisch hergestellt werden, da Naturprodukte die Anforderungen bezüglich chemischer Reinheit, Homogenität und vor allem Konstanz nicht erfüllen. In den letzten Jahren hat sich der Trend hin zu immer feineren und reineren Pulvern bis in den Nanometerbereich weiter verstärkt.

2.1.4.2. Aufbereitung

Die Aufbereitung beinhaltet das (Zerkleinern und) homogene Mischen sämtlicher Ausgangskomponenten. Als Aggregate kommen im allgemeinen Trommel-, Schwing- und Attritormühlen zum Einsatz. Der Mahlvorgang erfolgt meist in einer wässrigen Suspension. Daneben ist in Sonderfällen auch noch die Trockenmahlung gebräuchlich. Im Anschluss an die Nassmahlung erfolgt bei technischer Keramik sehr oft der Prozessschritt "Sprühtrocknung" (Bild 8). Hierbei wird die wässrige Suspension zerstäubt und die entstehenden Tröpfchen werden im heißen Luftstrom getrocknet. Es entsteht dabei ein gut weiterverarbeitbares, fließfähiges Granulat (Bild 9).

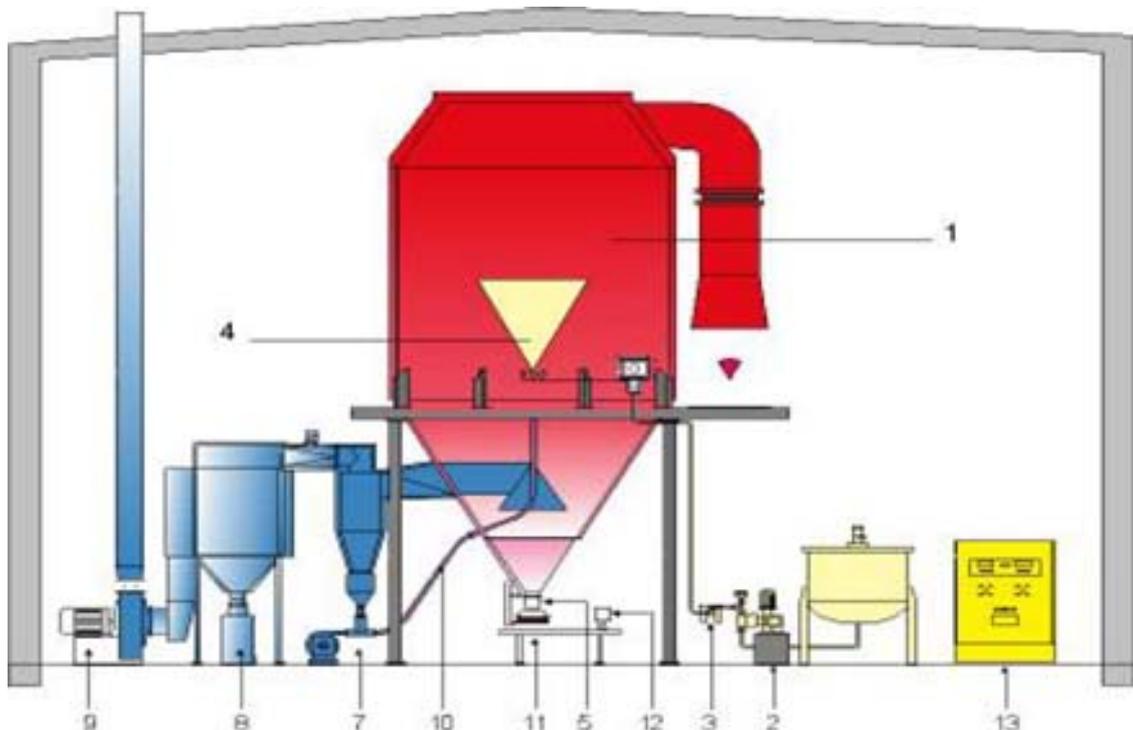


Bild 8: Granulatherstellung durch Sprühtrocknung (Fa. Dorst)

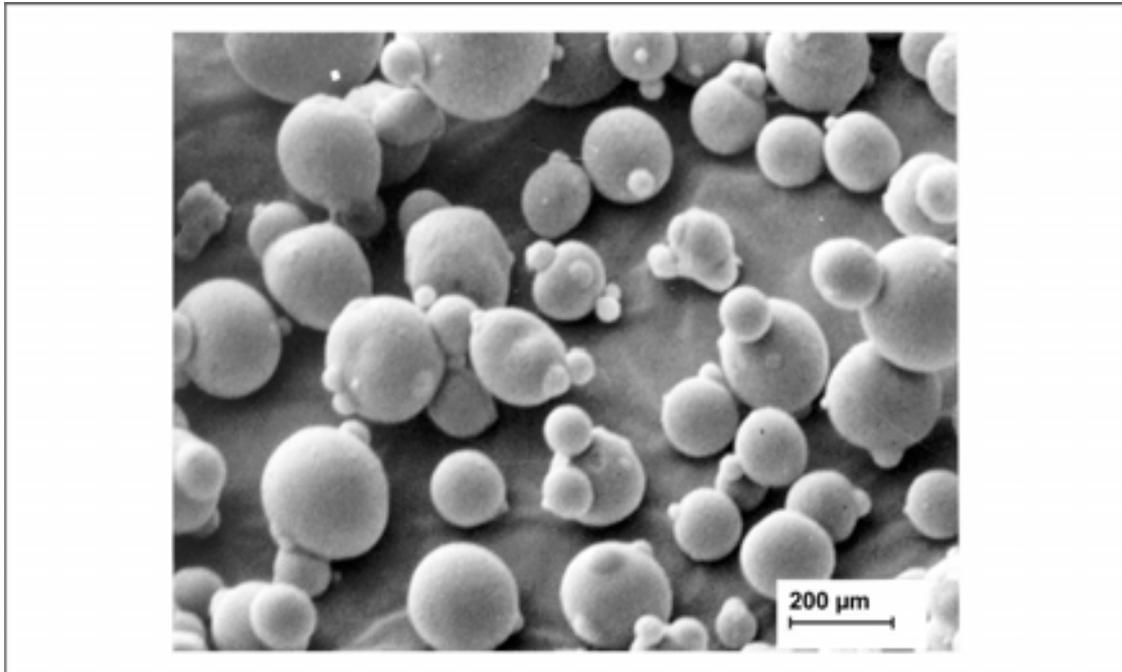


Bild 9: Aluminiumoxid-Sprühgranulat

2.1.4.3. Formgebung

Durch den Formgebungsprozess soll eine vorbereitete Masse (als Granulat oder in flüssiger Form als "Schlicker") in eine gewünschte Form gebracht werden, die aus Kostengründen der Bauteilform bereits möglichst nahe kommen sollte, um eine (meist teure) Nachbearbeitung zu minimieren.

Die wirtschaftlichste Art der Formgebung für eine Serienfertigung ergibt sich im Wesentlichen aus der Bauteilgeometrie und den geforderten Maßtoleranzen. In jedem Falle ist zu beachten, dass die Werkstücke stets größer ausgeführt werden müssen, da sich die Teile beim nach geschalteten Brand (Sintern) um ca. 20 % verkleinern ("Schwindung").

Pressen	<ul style="list-style-type: none"> • Uniaxiales Pressen • isostatisches Pressen • heiß(isostatisches) Pressen
Giessen	<ul style="list-style-type: none"> • Schlickergiessen • Foliengiessen
Plastisches Formen	<ul style="list-style-type: none"> • Spritzgiessen • Extrudieren
Sonstige	<ul style="list-style-type: none"> • Flammspitzen • Plasmaspitzen

Bild 10: Formgebungsverfahren in der keramischen Technologie

Bild 10 zeigt in einer Übersicht die in der Keramik üblichen Formgebungsverfahren. Eine Sonderstellung haben das Heißpressen sowie das heißisostatische Pressen, da bei diesen beiden Verfahren die Herstellungsschritte "Formgebung" und "Brand" in einem Arbeitsschritt erfolgen.

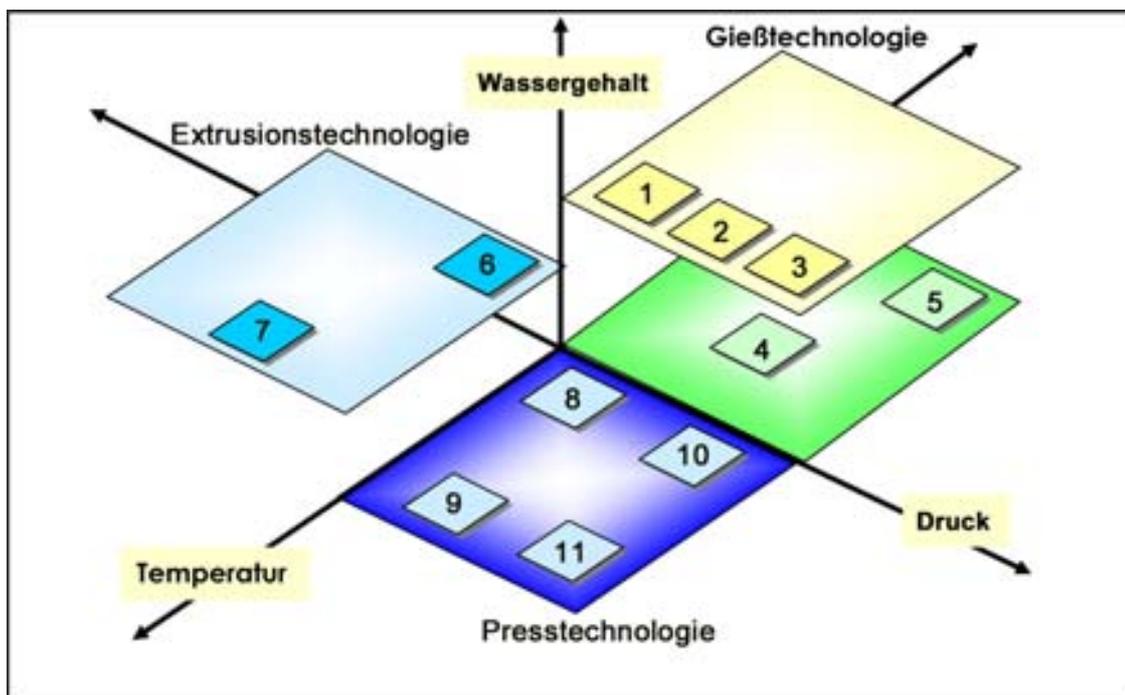


Bild 11: Formgebungsverfahren in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Wassergehalt

Einführung

Eine Einteilung der Formgebungsverfahren kann auch nach den Formgebungsparametern Druck, Temperatur und Wassergehalt erfolgen (Bild 11).

2.1.4.3.1. Formgebung durch Verdichten („Pressen“)

Die größte Bedeutung als großserientaugliches Verfahren hat in der Technischen Keramik die Formgebung durch **uniaxiales Pressen** erreicht.

Dabei werden gut rieselfähige Granulate in Stahl- oder Hartmetallmatrizen, die entsprechend dem herzustellenden Teil profiliert sind, verdichtet.

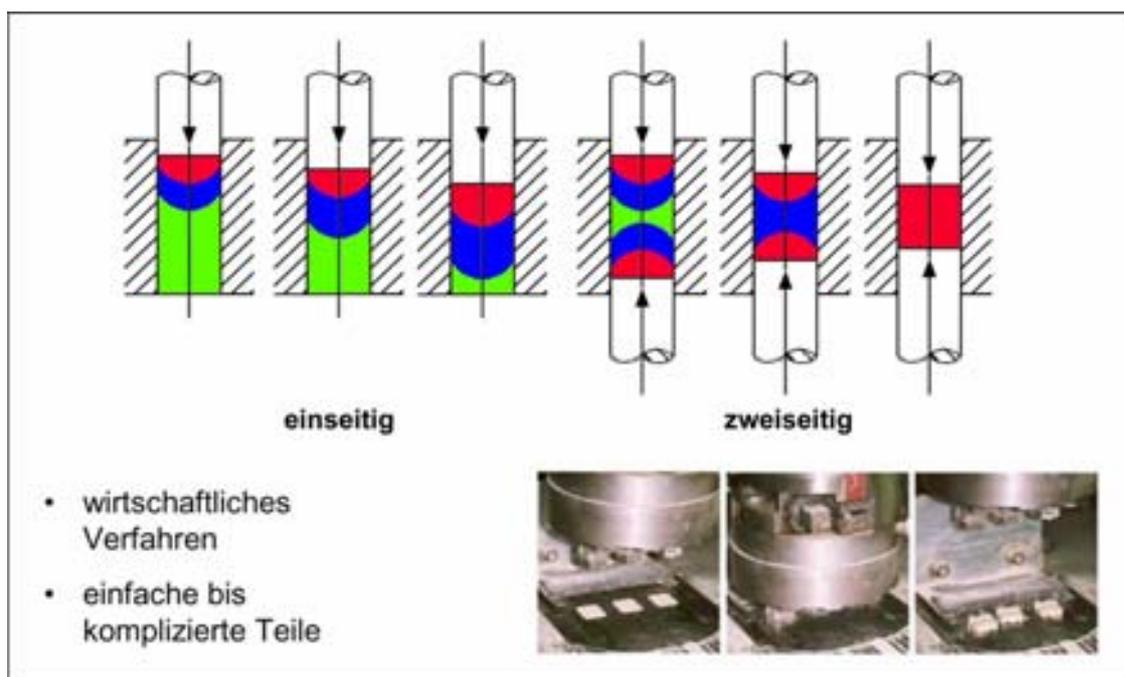


Bild 12: Uniaxiales Pressen,
Farbig: Dichteverteilung im Presskörper beim Verdichten

Bild 12 zeigt schematisch die einzelnen Schritte beim so genannten Trockenpressen (uniaxial). Während des Verdichtungs Vorganges wird das Granulat auf ca. 50 - 60 % seines ursprünglichen Volumens verdichtet. Um eine möglichst gleichmäßige Dichteverteilung im Pressling zu erreichen, wird von beiden Seiten (in Pressrichtung) verdichtet.

Beim **isostatischen Pressen** wird das zu verdichtende Granulat von einer elastischen Form (Latex o. ä.) umhüllt, auf die von außen über eine Flüssigkeit allseitig hydrostatisch Druck aufgebracht wird.

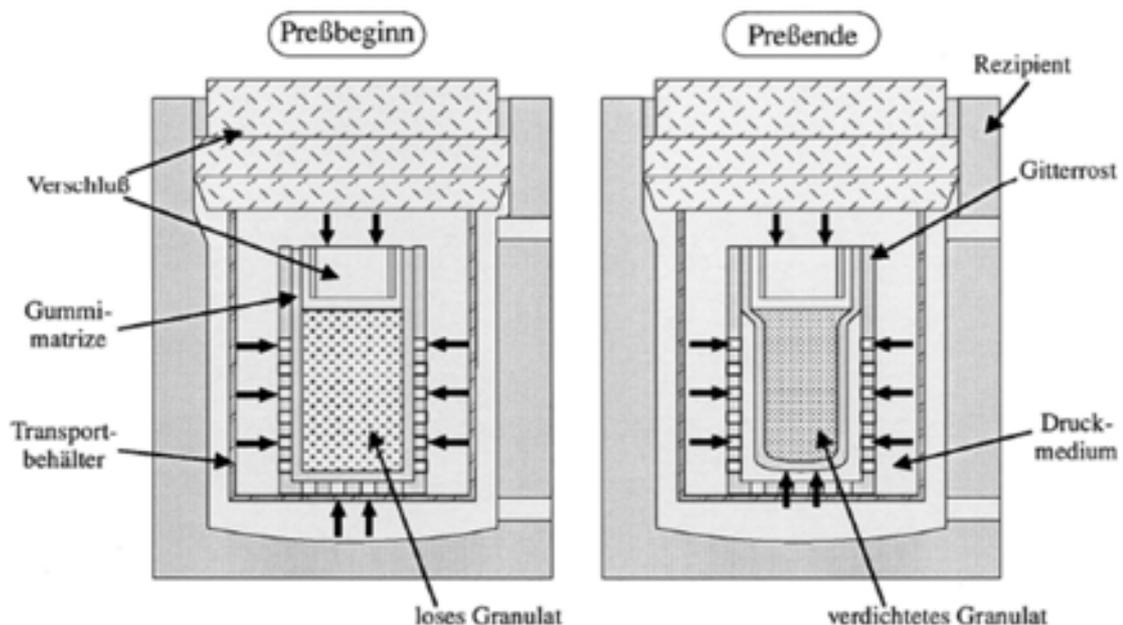


Bild 13: Verdichten von Granulaten beim isostatischen Pressen

Das isostatische Pressverfahren liefert durch die allseitige Druckbeaufschlagung Rohkörper mit gleichmäßiger Verdichtung, die durch eine nachgeschaltete Bearbeitung vor dem Sintern „in Form“ gebracht werden. Wegen der Nachbearbeitung ist das Verfahren nur für mittlere bis kleine Serien geeignet (Kosten!).

2.1.4.3.2. Formgebung durch plastische Verformung

Das Funktionsprinzip der plastischen Verformung beruht auf der Eigenschaft von bildsamen (verformbaren) keramischen Massen, auf äußere Kräfte mit einer bleibenden Formänderung zu reagieren.

Das **Extrudierverfahren** wird immer dann angewendet, wenn rotationssymmetrische Bauteile hergestellt werden müssen, deren Längen- zu Querschnittsverhältnis sehr groß ist, wie z. B. Rohre, Stäbe, Wabenkörper etc. Beim Extrudieren werden dem Pulver neben Wasser noch diverse organische Binder und Gleitmittel zugemischt, so dass eine plastisch verformbare Masse entsteht. Die Verarbeitung

Einführung

dieser Massen geschieht i. a. in so genannten Schnecken- oder Kolbenextrudern (Bild 14).

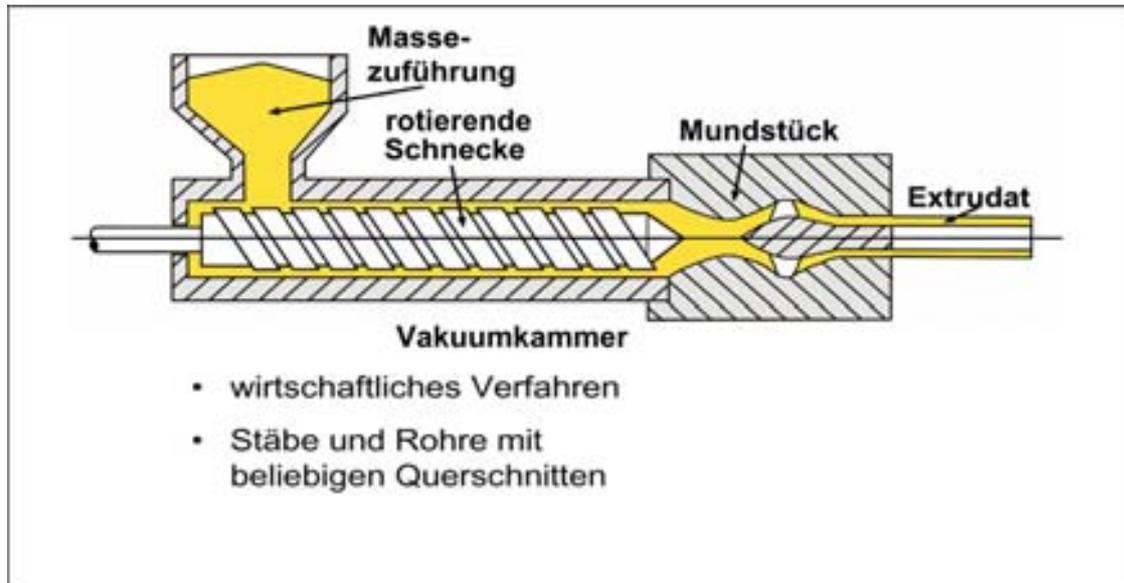


Bild 14: Schneckenextruder (schematisch)

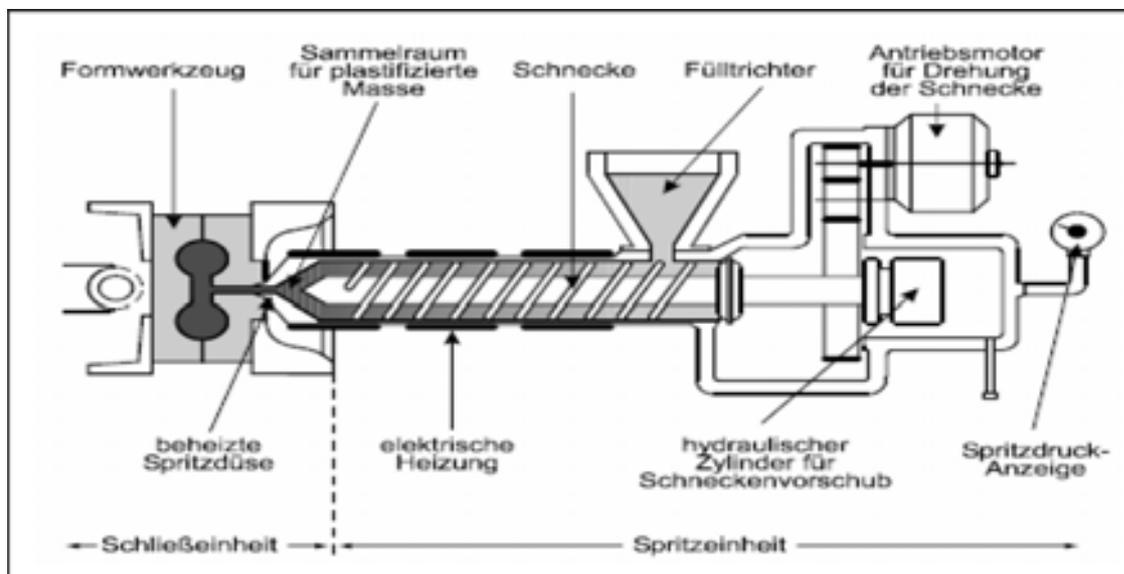


Bild 15: Spritzgießen (schematisch)

Die in der Kunststoffverarbeitenden Industrie weit verbreitete **Formgebung durch Spritzguss** wird auch im Bereich der technischen Keramik eingesetzt. Zum Spritzgießen wird das keramische Pulver mit diversen organischen Komponenten (u. a. Thermoplaste) vermischt. Beim Erhitzen der Masse wird diese durch die Erweichung der Thermoplaste verflüssigt. Die flüssige Masse wird anschließend mit Druck

Einführung

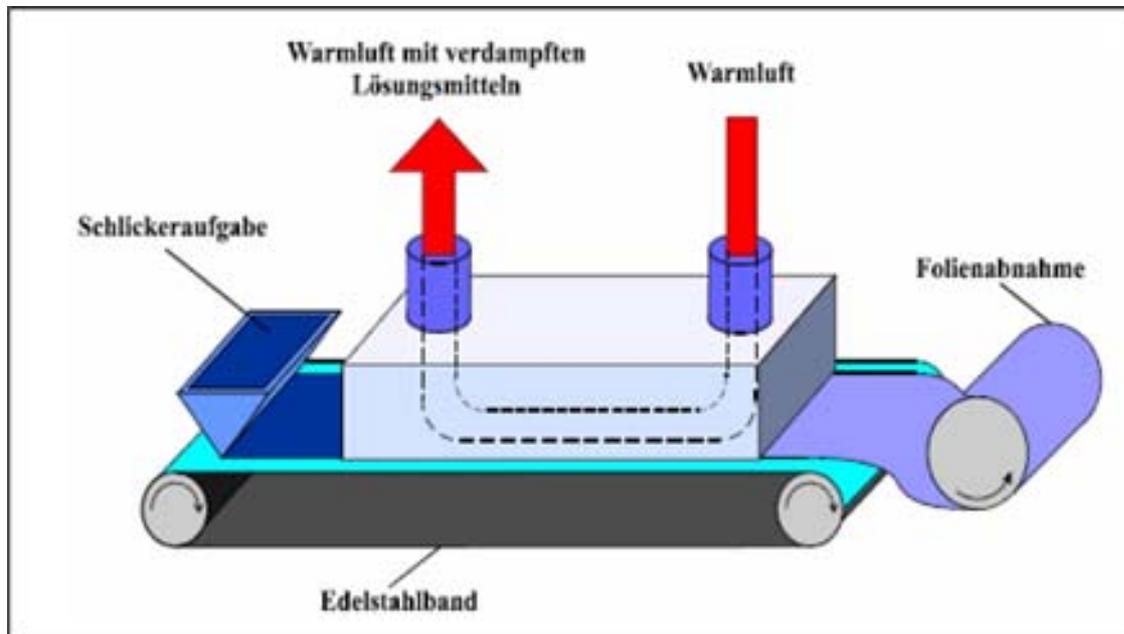


Bild 17: Foliengießen (schematisch)

Durch Variation der Spalthöhe lässt sich die Dicke der Folien (0,1 - 1,5 mm) einstellen. Während des Transportes der Folie zum anderen Ende des Gießbandes strömt warme Luft im Gegenstrom über die Folie hinweg. Am Ende des Gießbandes kann die getrocknete, flexible Folie abgezogen und aufgewickelt werden.

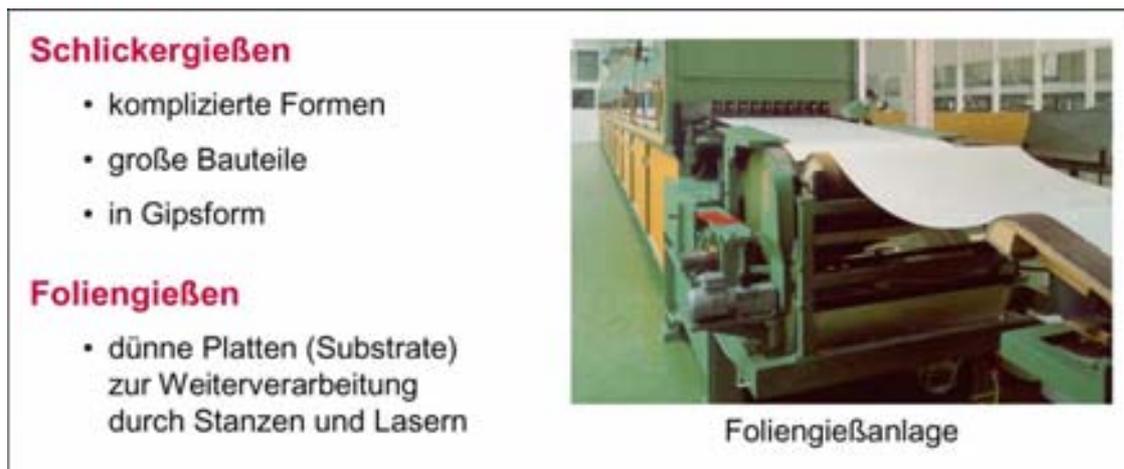


Bild 18: Gießband mit Aluminiumoxidfolie

2.1.4.3.4. Sonstige Formgebungsverfahren

Bei den thermischen Spritzverfahren (**Plasmaspritzen, Flamm-spritzen**) können durch das Aufspritzen geschmolzener keramischer Pulver z. B. auf rotierende rohrförmige metallische Werkzeuge Bauteile hergestellt werden. Nach dem Erstarren der Schmelze wird das metallische Werkzeug abgezogen.

2.1.4.3.5. Grünbearbeitung

Unter Grünbearbeitung versteht man die konturnahe Bearbeitung eines Teiles durch Drehen, Fräsen, Bohren etc. vor dem Brand (z. B. aus einem über isostatisches Pressen hergestellten Rohling). Die Formgebung durch Grünbearbeitung ist vor allem für die Musterherstellung, für Einzelteilfertigung oder für Kleinserien geeignet.

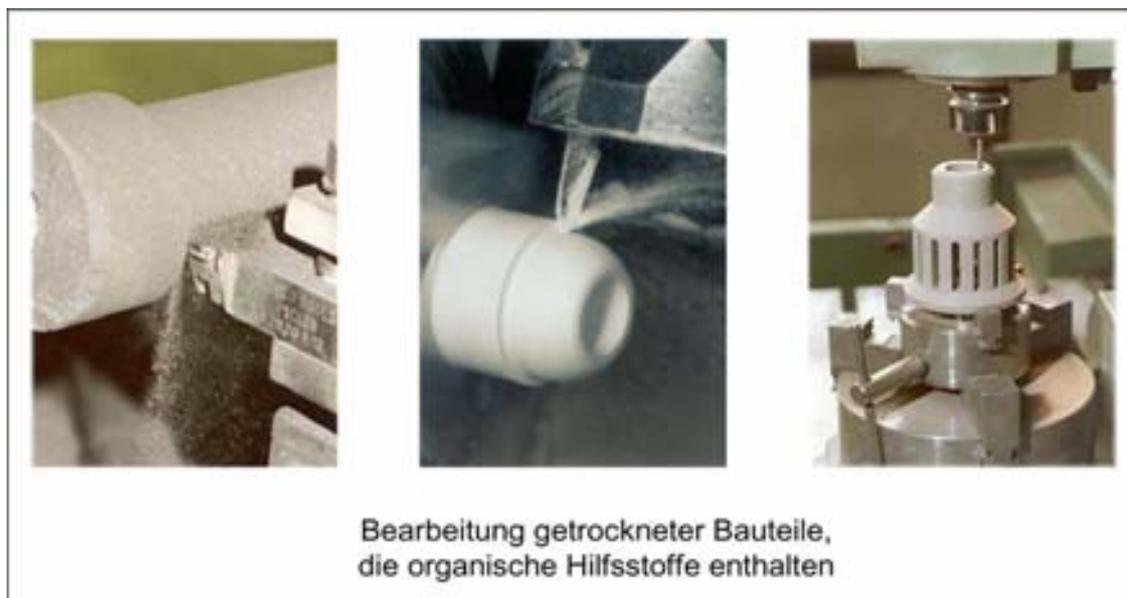


Bild 19: Grünbearbeitung keramischer Rohkörper

2.1.4.4. Verfestigung durch Temperaturbehandlung – der Sinterbrand

Das Sintern umfasst den sehr komplexen Vorgang der Verdichtung eines pulverförmigen Materials unter Temperatureinwirkung. Dabei findet durch Diffusionsprozesse ein Materialtransport statt. Die

Einführung

treibende Kraft für diesen Vorgang ist das Bestreben jedes Pulverkörpers, die Oberflächenenergie zu vermindern. Bild 20 zeigt schematisch die verschiedenen Sinterstadien. Der Verdichtungsprozess ist mit einem Schrumpfungsprozess (Größenordnung ca. 20 %) unter Beibehaltung der Form verbunden.

Erst nach der Verfestigung durch den Brand entsteht die Keramik mit ihren gewünschten Eigenschaften.

Die in der technischen Keramik üblichen Sintertemperaturen liegen je nach Werkstoff im Bereich von 1.050°C bis 2.200°C. Der Sinterprozess kann durch die Atmosphäre (Luft, Schutzgas etc.) wesentlich beeinflusst werden. Zusätzlich wird bei einigen Werkstoffvarianten noch mit Druckunterstützung (z. T. bis 2.000 bar) gearbeitet (Heißpressen, heißisostatisches Pressen, Gasdrucksintern).

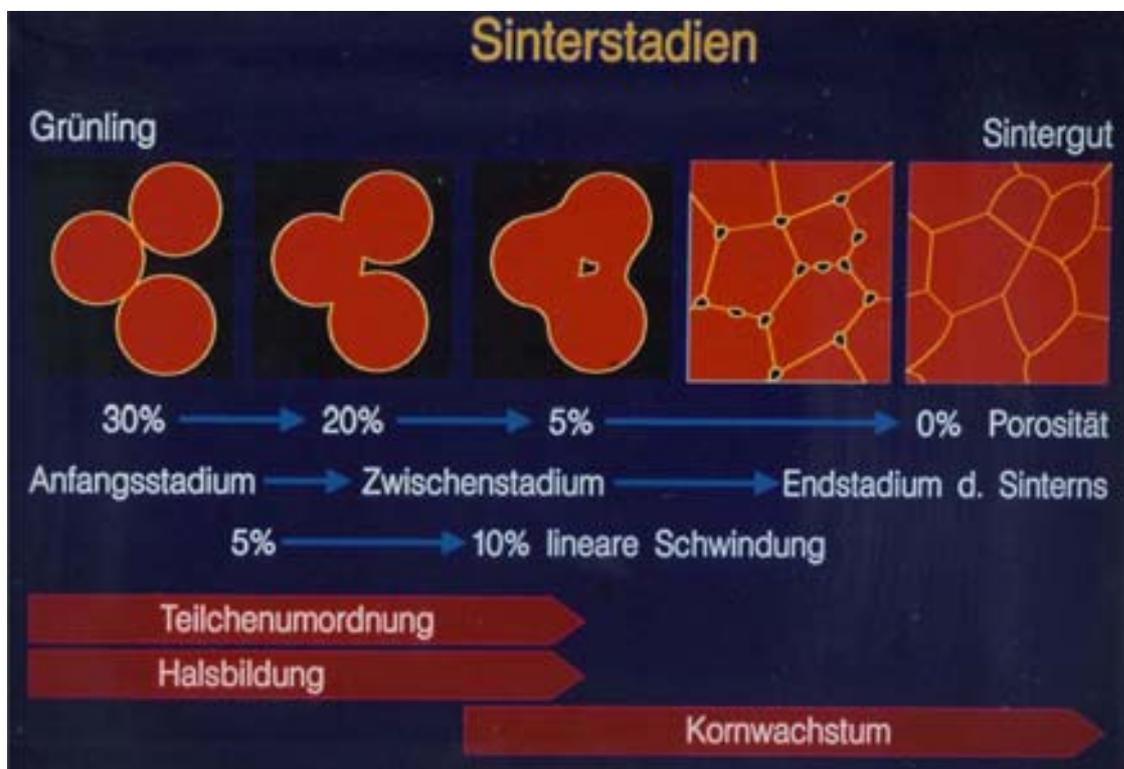


Bild 20: Schematische Darstellung der verschiedenen Sinterstadien

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Drucklossintern ➤ Reaktionssintern 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>Diskontinuierlich</u> Kammeröfen Herdwagenöfen Haubenöfen Drehherdofen (Mikrowellensintern)
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Schutzgassintern ➤ Infiltrieren 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gasdrucksintern ➤ Heißpressen ➤ Heißisostatpressen 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>Kontinuierlich</u> Tunnelofen Rollenofen Schubplattenofen Drehofen Bandofen

Bild 21: Optionen beim Sintern von technischer Keramik

Je nachdem, von welchen Rohstoffen ausgegangen wird, bzw. welche Herstellungsrouten angewandt wird, entstehen Gefüge/Werkstoffe mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften (Bild 22).

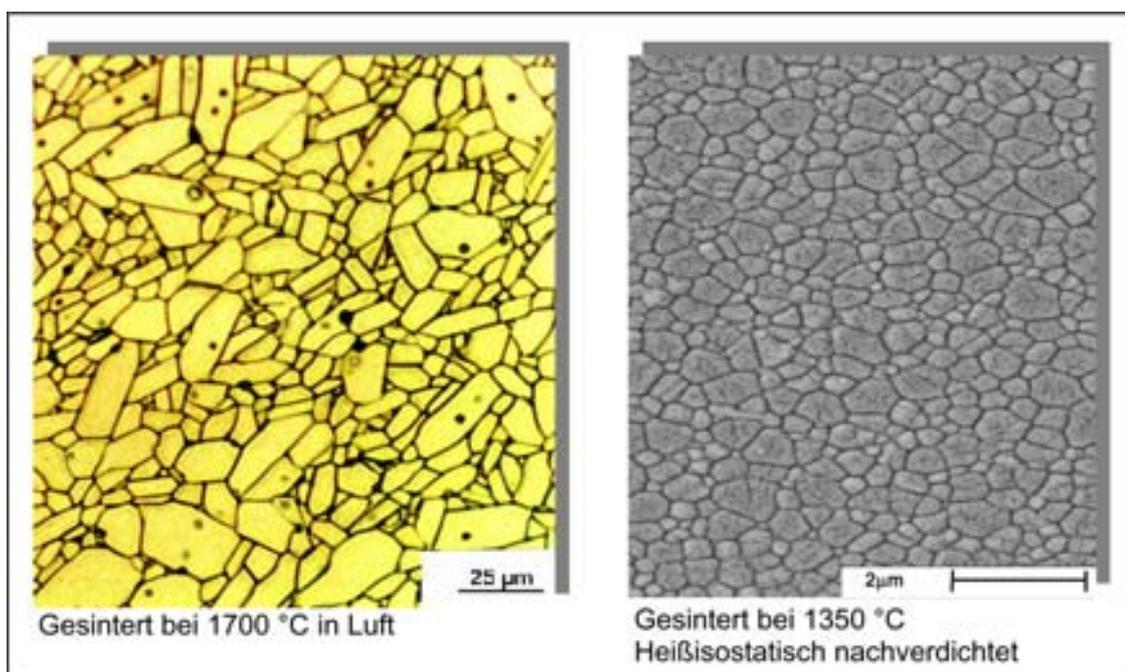


Bild 22: Gefüge von Aluminiumoxid; Vergleich unterschiedlicher Herstellungsrouten

Einführung

Werkstoff	Schwindung S
SISIC/RSIC	ca. 0 %
SSIC	18 - 20 %
poröser Cordierit	ca. 3 %
Tonerdeporzellan	ca. 13 - 16%
Al_2O_3	ca. 18%
ZrO_2	ca. 25%

Bild 23: Schwindung unterschiedlicher Werkstoffe

Typische Schrumpfungswerte liegen im Bereich von ca. 18-22 %. Eine Ausnahme bilden hier die SiC-Varianten SISIC (siliciuminfiltriertes SiC) und RSIC (rekristallisiertes SiC), die keine nennenswerte Schrumpfung zeigen. Dadurch sind sehr komplexe bzw. große Bauteile darstellbar.

2.1.4.5. Endbearbeitung

Bedingt durch die Verfahrensschritte "Formgebung" und "Brennen" müssen keramische Bauteile wegen der Anforderungen an Maßgenauigkeit und Oberflächengüte, z. B. wegen Dicht- und Gleitaufgaben von Funktionsflächen endbearbeitet werden.

Die Nachbearbeitung hochfester keramischer Bauteile ist aufgrund der Härte- und Verschleißfestigkeit und der somit notwendigen teuren (Diamant-) Werkzeuge und Hilfsmittel kostenintensiv. Aufgrund der hohen Werkstoffhärte kommen nur abtragende Verfahren wie Schleifen, Honen, Läppen sowie Sonderverfahren wie Ultraschall- und Laserbearbeitung in Frage.

Wie bei der Bearbeitung von metallischen Werkstoffen werden auch bei keramischen Werkstoffen die erreichbaren Toleranzen und Oberflächengüten sehr stark vom angewendeten Fertigungsverfahren bestimmt.

Endbearbeitung

- wird notwendig um die Anforderungen an die Maßgenauigkeit zu erfüllen
- Anforderungen an die Oberflächenqualität zu erfüllen
- **ist verbunden mit**
 - hohen Werkzeugkosten
 - z. T. langen Bearbeitungszeiten

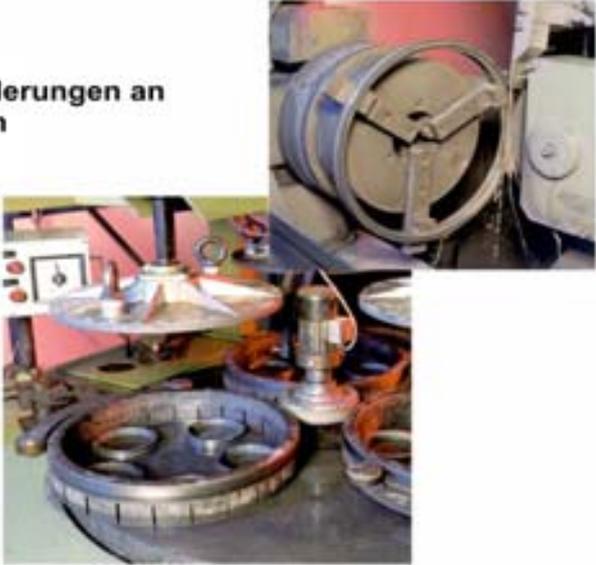


Bild 24: Endbearbeitung

In Bild 25 sind beispielhaft Anhaltswerte für die erzielbaren Toleranzwerte von der Formgebung bis zum Endprodukt dargestellt.

Fertigungsschritte	Bauteil	Standardtoleranzen	Toleranzen mit Präzisionsverfahren
Formgebung / Grünbearbeitung			
Sintern		± 2%	± 1%
Endbearbeitung		± 5 µm	± 0,1 µm

Bild 25: Toleranzen und Schwindung

2.1.4.6. Verbindungstechnik

Weitere spezielle Verfahrensschritte können verschiedene Verbindungstechniken sein, die in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung gewonnen haben. Ziel ist die Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe und/oder die Realisierung komplizierter Konstruktionen.



Bild 26: Verbindungstechniken für (Metall)-Keramik-Verbunde

Von den in Bild 26 genannten Verbindungstechniken haben die Verfahren Löten, Schrumpfen und Eingießen die größte technische Bedeutung erlangt.

2.1.5. Eigenschaften

Gegenüber den Metallen bieten Hochleistungskeramiken eine Reihe von Vorzügen:

- Härte
- Verschleißfestigkeit
- Korrosionsbeständigkeit
- Formstabilität
- Warmfestigkeit

- elektrisches Isolationsvermögen
- geringes spezifisches Gewicht

Dem stehen als Nachteile gegenüber:

- Sprödigkeit
- Thermoschockempfindlichkeit
- Herstellkosten
- ggf. Verbindungstechnik

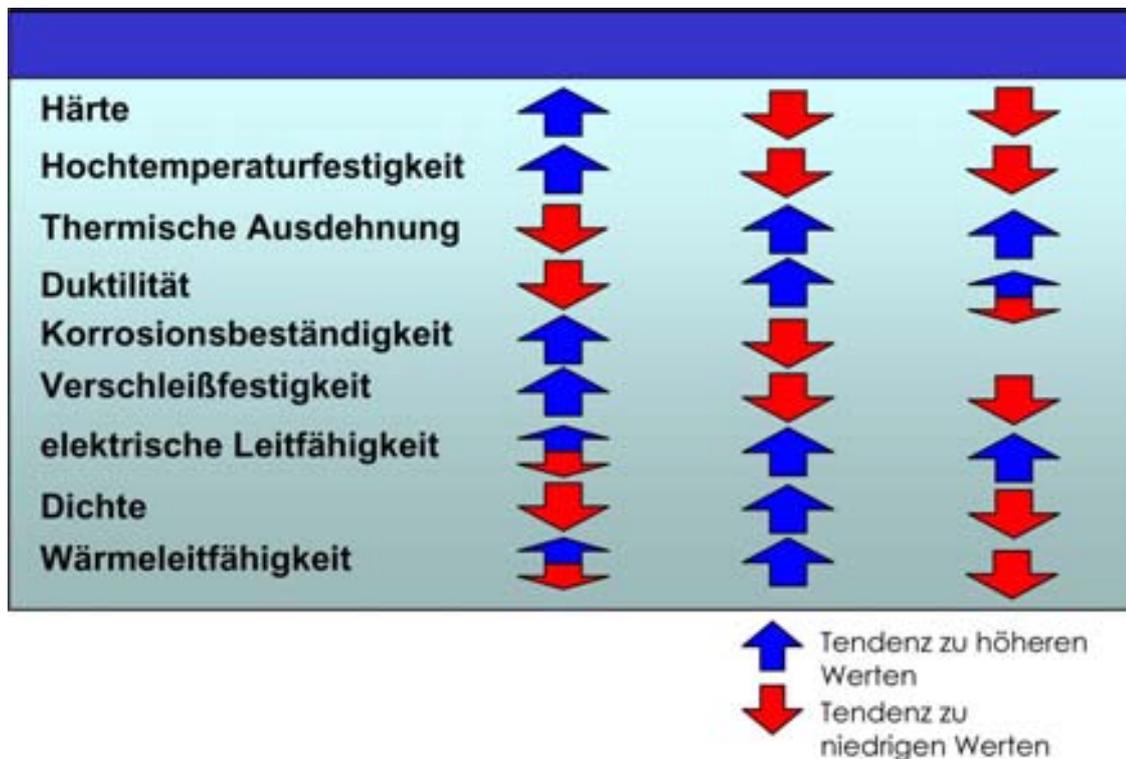


Bild 27: Allgemeiner Vergleich zu Metall

Bedingt durch z. T. sehr unterschiedliche Eigenschaften ergeben sich sehr differenzierte Anwendungsgebiete, wo die Vorteile der Keramik gezielt genutzt werden.

Je nach Ausgangsmaterial und Herstellungsmethode lassen sich die keramischen Hochleistungswerkstoffe in verschiedene Werkstoffvarianten unterteilen, die sich z. T. erheblich in ihren Werkstoffeigenschaften unterscheiden können.

Einführung

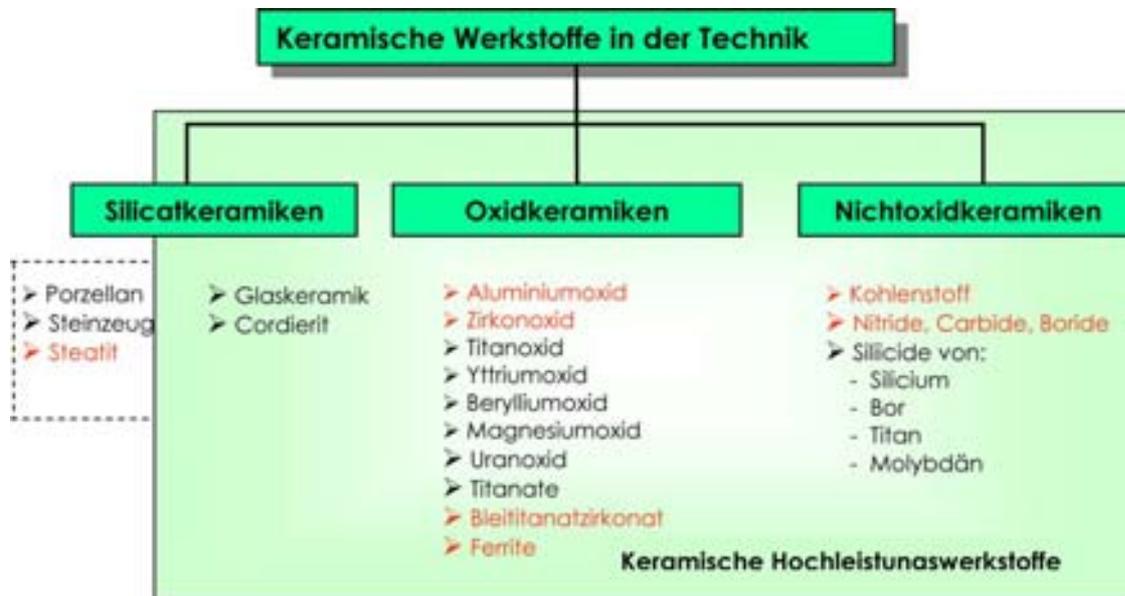


Bild 28: Keramische Werkstoffe

Die wichtigsten keramischen Werkstoffe sind rot gekennzeichnet

Somit ist es durch die genaue Kenntnis der Bauteilanforderungen möglich, den Werkstoff durch die Auswahl des geeigneten Herstellungsverfahrens gezielt auf die spätere Applikation zu optimieren.

Um die Vorteile der Keramik optimal nutzen zu können, ist eine sehr enge Zusammenarbeit zwischen Anwender und Hersteller unumgänglich. Dazu benötigt einerseits der Keramikproduzent möglichst umfassende Informationen über die vorgesehene Anwendung und andererseits der Anwender detaillierte Kenntnisse über den zu verwendenden Werkstoff. Besondere Bedeutung kommt hier den im Vergleich zu Metallen vollkommen anderen Konstruktionskriterien zu. Nur gemeinsam lässt sich das bestmögliche Ergebnis erzielen!

2.1.6. Die wichtigsten Werkstoffe im Überblick

Insbesondere auf Basis von Aluminiumoxid haben Keramiken bereits eine breite Anwendung in der Technik gefunden. Neue Marktuntersuchungen ergaben bezüglich der Werkstoffgruppen in etwa folgende Marktanteile:

Silicate	nach Menge	nach Wert
• Porzellan	ca. 40 %	ca. 15 %
• Steatit	ca. 20 %	ca. 10 %
Oxide		
• Aluminiumoxid	ca. 20 %	ca. 40 %
Nichtoxide		
• Siliciumcarbide	ca. 5 %	ca. 15 %
Nicht aufgeführte	ca. 15 %	ca. 20 %

Bild 29: Wichtige Keramiken und deren Marktbedeutung

Zirkonoxid wird vor allem in Bereichen eingesetzt, wo höchste mechanische Belastungen auftreten. Da dort seine Eigenschaften voll zur Geltung kommen wird der Kostennachteil relativiert.

Daneben haben die genannten unterschiedlichen Marktanteile aber auch historische Gründe: Aluminiumoxid wird als Werkstoff bereits seit ca. 60 - 70 Jahren verwendet, während z. B. ZrO_2 erst seit ca. 30 Jahren intensiv erforscht und damit auch zunehmend eingesetzt wird. Im Vergleich zu den Oxiden ist aufgrund der Kostensituation der Marktanteil von SiC und Si_3N_4 vergleichsweise gering. Aufgrund ihrer z. T. ungewöhnlichen Eigenschaftskombination hat der Marktanteil der Nichtoxide in den letzten Jahren jedoch kontinuierlich zugenommen.

2.1.6.1. Silikatkeramische Werkstoffe

2.1.6.1.1. Steatit

Steatit ist ein keramischer Werkstoff auf der Basis natürlicher Rohstoffe und besteht aus der Hauptkomponente Speckstein, einem natürlichen Magnesiumsilikat und aus Zusätzen von Ton und Flussmittel. Steatit wird normalerweise dicht gesintert. Die Art des Flussmittels beeinflusst die elektrischen Eigenschaften des Werkstoffes und führt zur Unterscheidung in Normalsteatit und Sondersteatit.

Einführung

Sondersteatit besitzt gute mechanische und dielektrische Eigenschaften und findet seit mehr als 60 Jahren schwerpunktmäßig Anwendung in der Elektrotechnik.

Das Material eignet sich aufgrund seiner geringen Schwindung besonders für die wirtschaftliche Fertigung von Bauteilen mit engen Toleranzen und wegen der abrasionsärmsten, werkzeugschonendsten Rohstoffbasis aller keramischen Werkstoffe insbesondere für das Trockenpressverfahren.



Bild 30: Steatit; die wichtigsten anwendungstechnischen Merkmale

2.1.6.1.2. Cordierit; Mullitkeramik

Cordieritkeramiken sind Magnesiumaluminiumsilikate, die sich insbesondere durch eine sehr gute Temperaturwechselbeständigkeit (TWB) auszeichnen.

Mullitkeramiken bestehen, i. a. aus Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2$). Al_2O_3 und Glasphase. Auch sie zeichnen sich durch hohe TWB aus.

2.1.6.2. Oxidkeramische Werkstoffe

2.1.6.2.1. Aluminiumoxid (Al_2O_3)

Aluminiumoxid ist unter den modernen Keramiken der Werkstoff, welcher die breiteste Anwendung gefunden hat. Es gibt verschiedene Werkstoffgruppen, die sich im Wesentlichen im Al_2O_3 -Gehalt unterscheiden.

Je niedriger der Anteil an Al_2O_3 , umso höher sind die Mengen an SiO_2 , CaO und MgO und anderen Zuschlägen in Form von Silikaten und Spinellen. Für die zuvor genannten verschiedenen Werkstofftypen werden Pulver mit unterschiedlichem Verunreinigungsgrad, z. B. an SiO_2 , Fe_2O_3 und Na_2O verwendet. Darüber hinaus können sich die Pulver auch in ihrer Pulvercharakteristik, wie z. B. spezifischer Oberfläche, Korngrößen- und Kristallgrößenverteilung unterscheiden. Nach der Zugabe von entsprechenden Sinterhilfsmitteln, z. B. Ton oder Kaolin bei niedrigem Al_2O_3 -Gehalt oder Magnesiumverbindungen bei hohen Al_2O_3 -Gehalten und entsprechender Formgebung, werden die Pulvergemische bei 1.300 - 1.700 °C gesintert. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung ändern sich die Eigenschaften. So steigen z. B. mit zunehmender Reinheit der Werkstoffe Biegefestigkeit, E-Modul und Wärmeleitfähigkeit an.



Bild 31: Aluminiumoxid (Al_2O_3)

2.1.6.2.2. Zirkonoxid (ZrO_2)

Hervorragende Eigenschaften:

- höchste Biegebruch- und Zugfestigkeit
- hohe Bruchzähigkeit
- hohe Verschleißfestigkeit
- niedrige Wärmeleitfähigkeit,
- Wärmedehnung ähnlich Gußeisen
- E-Modul ähnlich Stahl
- Sauerstoffionenleitfähigkeit
- sehr gute tribologische Eigenschaften (sehr gut für Gleitpaarungen geeignet)

Werkstoffvarianten: FSZ, TZP, PSZ



Kalottenlager aus ZrO_2

Drahtumlenkrollen aus ZrO_2

Bild 32: Zirkonoxid (ZrO_2)

Zirkonoxid kommt in drei Modifikationen vor, wobei bis oberhalb $1.000\text{ }^\circ\text{C}$ die stabile Phase monoklin ist. Oberhalb dieser Temperatur erfolgt die reversible Umwandlung in die tetragonale Modifikation, welche mit einer deutlichen Volumenzunahme verbunden ist;

$> 2.300\text{ }^\circ\text{C}$ ist das kubische ZrO_2 stabil. Der für den technischen Einsatz von ZrO_2 sehr störende Volumensprung bei der Umwandlung monoklin \leftrightarrow tetragonal kann durch eine vollständige Stabilisierung verhindert werden; als stabilisierende Additive haben sich MgO , CaO , Y_2O_3 und CeO_2 bewährt. Von großer technischer Bedeutung ist die Teilstabilisierung. Hierbei sind bei Raumtemperatur im kubischen ZrO_2 -Gitter gleichmäßig monokline Partikel verteilt, die beim Abkühlen aus der tetragonalen Phase entstanden sind. Durch den damit verbundenen Volumenzuwachs ist das Gefüge "vorgespannt", wodurch die Sprödigkeit des Materials herabgesetzt werden kann.

Beim so genannten umwandlungsverstärkten ZrO_2 findet die Phasenumwandlung monoklin \leftrightarrow tetragonal beim Anlegen einer äußeren mechanischen Belastung am Bauteil statt. Durch diesen bevorzugt in der Außenschicht (maximale Spannung) auftretenden Mechanismus entstehen Druckspannungen, welche die mechanische Festigkeit

deutlich erhöhen. Beim polykristallinen tetragonalen ZrO_2 (TZP) wird durch die Verwendung von extrem feinen, meist tetragonalen Ausgangspulvern ein sehr feinkörniges Gefüge mit geringen Anteilen an monokliner Phase erreicht. Dieses Material zeichnet sich durch eine außerordentlich hohe mechanische Festigkeit von bis zu 1.500 MPa aus.

FSZ:

- **Vollstabilisiertes Zirkonoxid** mit kubischem Kristallgitter

PSZ:

- **Teilstabilisiertes Zirkonoxid** kubischer und tetragonaler Phase

TZP:

- **Tetragonalstabilisiertes Zirkonoxid** mit tetragonalem Kristallgitter

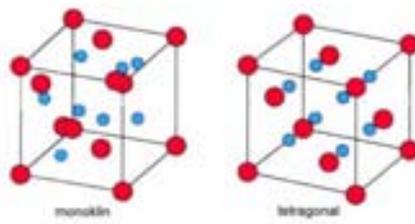


Bild 33: Zirkonoxid (ZrO_2) - Werkstoffvarianten

2.1.6.2.3. Aluminiumtitanat (Al_2TiO_5)

Besondere Eigenschaften:

- niedrige Wärmeleitfähigkeit
- sehr niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient und damit verbundener sehr hohe Temperaturwechselbeständigkeit
- geringer Benetzbarkeit durch Aluminium- und Buntmetallschmelzen
- offene Porosität



Hilfsmittel für den NE-Metallguß

Bild 34: Aluminiumtitanat (Al_2TiO_5)

Einführung

Aluminiumtitanat ist ein keramischer Werkstoff mit einem ungewöhnlich niedrigen E-Modul, der dem Material eine "Quasi-Elastizität" verleiht.

Als weitere positive Eigenschaften von Aluminiumtitanat sind die hohe Einsatztemperatur, das gute Thermoschockverhalten, das ausgezeichnete Wärmeisolationsvermögen sowie die Korrosionsbeständigkeit gegenüber metallischen Schmelzen bei hohen Temperaturen zu nennen.

2.1.6.2.4. Sonstige Oxide

Berylliumoxid wird trotz einiger herausragender Eigenschaften (extrem hohe Wärmeleitfähigkeit) infolge der Toxizität von Berylliumverbindungen nunmehr in Sonderfällen verwendet.

Hafniumoxid und Thoriumoxid spielen vom wirtschaftlichen Standpunkt als keramische Werkstoffe keine Rolle.

2.1.6.3. Nichtoxidkeramische Werkstoffe

Siliziumnitrid (Si_3N_4), Aluminiumnitrid und Borkarbid. Bei SiC und Si_3N_4 gibt es technologiebedingt eine ganze Reihe von Werkstoffvarianten.

Grundlage	Bezeichnung	Kurzbezeichnung
Siliziumkarbid (SiC)	Silikatisch gebundenes SiC	SiC
	rekristallisiertes SiC	RSiC
	nitridisch gebundenes SiC	NSiC
	siliciuminfiltriertes SiC	SiSiC
	gesintertes SiC	SSiC
	heißgepresstes SiC	HPSiC
	heißisostatisch gepresstes SiC	HIPSiC
Siliziumnitrid (Si_3N_4)	reaktionsgebundenes Si_3N_4	RBSN
	gesintertes Si_3N_4	SSN
	heißgepresstes Si_3N_4	HPSN
	heißisostatisch gepresstes Si_3N_4	HIPSN
	oasdruckgesintertes Si_3N_4	GPSN
AlN	Aluminiumnitrid	AN
B_4C	Borkarbid	BC

Bild 35: Die wichtigsten nichtoxidischen Werkstoffe Die wichtigsten Nichtoxidkeramiken sind Siliziumcarbid (SiC),

2.1.6.3.1. Siliciumcarbid (SiC)

Siliciumcarbid ist schon lange Zeit als Brennhilfsmittel in der Feuerfest-Industrie und als Heizleiter in der Elektroindustrie etabliert. Siliciumcarbid wird als Konstruktionswerkstoff insbesondere für den Maschinenbau, aber auch für Anwendungen in der Energietechnik und im Automotivbereich eingesetzt. Dabei sind die hohe Härte, die gute Wärmeleitfähigkeit und eine relativ gute Hochtemperaturfestigkeit hervorzuheben. Aufgrund der verschiedenen Herstellungswege sind verschiedene SiC-Arten im Gebrauch. Aufgrund des unterschiedlichen SiC-Gehaltes, der unterschiedlichen Dichte und der variierenden Gesamtporosität zeigen Werkstoffe aus SiC sehr unterschiedliche Eigenschaften.

Werkstoffvarianten mit folgenden gemeinsamen Eigenschaften:

- hohe bis sehr hohe Festigkeit
- Korrosionsbeständigkeit bis zu sehr hohen Anwendungstemperaturen
- hervorragende mechanische Hochtemperatüreigenschaften
- sehr gute Temperaturwechselbeständigkeit
- geringe Wärmedehnung
- sehr hohe Wärmeleitfähigkeit
- hohe Verschleißfestigkeit
- sehr hohe Härte
- Halbleitereigenschaften



Segmentierte SiC-Düse mit Halterung

Bild 36: Siliciumcarbid (SiC)

Siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid (SISiC) zeichnet sich insbesondere durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit und, im Vergleich zu anderen keramischen Werkstoffen, guten Temperaturwechselbeständigkeit aus. Daneben besitzt dieser Werkstoff ausgezeichnete Gleit- und Verschleißigenschaften. Da die Werkstoffvariante SISiC praktisch nicht schwindet, lassen sich große und/oder komplizierte Bauteile realisieren.

Einführung

Bei der Herstellung von drucklos gesintertem Siliciumcarbid (SSiC) wird von sehr feinen SiC-Pulvern mit hoher Oberflächenenergie ausgegangen, wobei Bor und Kohlenstoff als Sinterhilfsmittel zugesetzt werden. Bei Sintertemperaturen oberhalb 2.000 °C ist es möglich, Dichtewerte von über 90 % der theoretischen Dichte zu erzielen.

2.1.6.3.2. Siliciumnitrid (Si_3N_4)

Siliciumnitrid ist in den letzten Jahren besonders wegen seiner ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen ein interessanter Werkstoff für vielfältige Anwendungen geworden. Da Siliciumnitrid bei Normalbedingungen keinen Schmelzpunkt aufweist, scheidet die Herstellung über die flüssige Phase aus. Wegen des hohen Anteils an kovalenter Bindung und den damit verbundenen niedrigen Diffusionskoeffizienten ist das klassische Sintern ohne flüssige Phase in vertretbaren Zeiten ebenfalls nicht möglich. Durch die Zugabe von Sinteradditiven zu Si_3N_4 -Pulvern über einen Flüssigphasensinterprozeß kann ein dichtes Bauteil hergestellt werden (SSN). Die Verdichtung von Siliciumnitrid kann außerdem durch Anwendung eines von außen einwirkenden Drucks beim Heiß(isostatischen)pressen oder durch Gasdrucksintern (bis 100 bar) erreicht werden. Aufgrund der unterschiedlichen Porosität zeigen diese Werkstoffe sehr unterschiedliche Eigenschaften.



Bild 37: Siliciumnitrid (SN)

2.1.6.3.3. Aluminiumnitrid (AlN)

Aluminiumnitrid hat an Bedeutung gewonnen und ist in der Elektronikindustrie inzwischen etabliert. AlN zeichnet sich durch eine extrem hohe Wärmeleitfähigkeit ($> 180 \text{ W/mK}$) sowie durch seine hervorragende elektrische Isolationsfähigkeit aus. Die mechanischen Eigenschaften sind mit demjenigen von Aluminiumoxid vergleichbar.

Aufgrund des hohen Wärmeleitfähigkeitsvermögens liegt ein Hauptanwendungsgebiet im Bereich Hochleistungselektronik (Substrate für hochintegrierte Schaltungen mit hoher Leistungsdichte).



Bild 38: Aluminiumnitrid (AlN)

2.1.7. Zusammenfassung, Ausblick

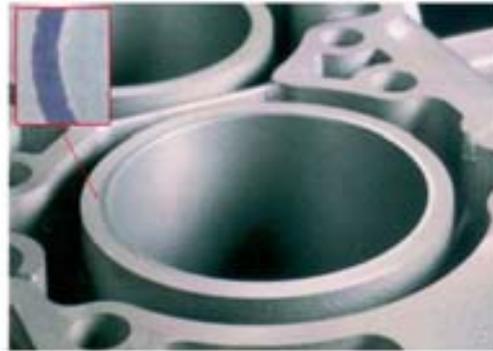
Das Haupthindernis, das derzeit viele interessante Anwendungen verzögert, ist die im Vergleich zu Metallen deutlich höhere Sprödigkeit der Keramik. Nachteilig sind weiterhin die im Vergleich zu Metallen oder Kunststoffen meist höheren Herstellkosten. Folgerichtig konzentrieren sich die derzeitigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf die Reduzierung bzw. Beseitigung dieser materialbedingten Nachteile.

Einführung

Neben den Herstellungsparametern gibt es aber noch andere Möglichkeiten, Festigkeit und Zuverlässigkeit zu verbessern.

Es bieten sich an:

- Verwendung extrem feiner und reiner Pulver (Nanoteilchen)
- Neue Herstellungstechnologien
- Umwandlungsverstärkung
- Faser-/ Whiskerverstärkung
- Mischkeramiken (Metall + Keramik)



SiC-Preform in Motorblock
eingegossen

Bild 39: Verbesserungspotentiale für neue Werkstoffe

Daneben ist die gezielte Beherrschung des Herstellprozesses unumgänglich - eine wesentliche Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg ist die Ausbeute!



Bild 40: Prüfung von Hüftgelenkkugeln (Prooftest)

So umfasst z.B. die Herstellung eines piezokeramischen Aktors 40 Produktionsstufen. Theoretisch fällt eine Ausbeute von nur 60 % an, wenn bei jedem Fertigungsschritt 1 % Ausschuss produziert wird (somit 99 % Ausbeute je Stufe!). Um die notwendige Prozesssicherheit zu erreichen, und somit auch den wirtschaftlichen Erfolg sicherzustellen, ist ein zuverlässiges Qualitätssicherungssystem notwendig. Oberstes Ziel dabei ist, **Qualität zu produzieren** und **nicht durch Aussortieren** von schadhaften Teilen zu erreichen!

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 71) finden sich auf den folgenden Seiten.

**Interessante Werkstoffe für
vielfältige Anwendungen**

Dr. Peter Stingl
CeramTec AG
Lauf a.d. Pegnitz



Gliederung

- 1. Geschichte der Keramik**
- 2. Definitionen/Nomenklatur**
- 3. Vom Rohstoff zum Fertigprodukt**
- 4. Die wichtigsten Werkstoffgruppen**
- 5. Typische Eigenschaftsmerkmale**
- 6. Ausblick**

Gliederung / Aufbau



1. Geschichte der Keramik
2. Definitionen/Nomenklatur
3. Vom Rohstoff zum Fertigprodukt
 - Pulver**
 - Aufbereitung**
 - Formgebung**
 - ① Schlickerguss
 - ② Folien gießen
 - ③ Spritzgießen
 - ④ Extrudieren
 - ⑤ Pressen
 - ⑥ Isostatisches Pressen
 - ⑦ Flamm spritzen
4. Die wichtigsten Werkstoffgruppen
 - Einteilung**
 - Werkstoffe**
 - Silikatkeramik
 - Oxidkeramik
 - Siliciumkarbid
 - Siliciumnitrid
 - Aluminiumnitrid
5. Typische Eigenschaftsmerkmale
 - Eigenschaftsvergleiche mit anderen Werkstoffen**
 - Pro/Contra Eigenschaften Werkstoffe**
 - Besonderheiten / Sprödebruch / Konstruktion**
 - Einschränkungen/Vorteile**
6. Ausblick
 - Vergleich Preisniveau**
 - Entwicklungstendenzen**
 - Marktentwicklung**

1. Geschichte der Keramik

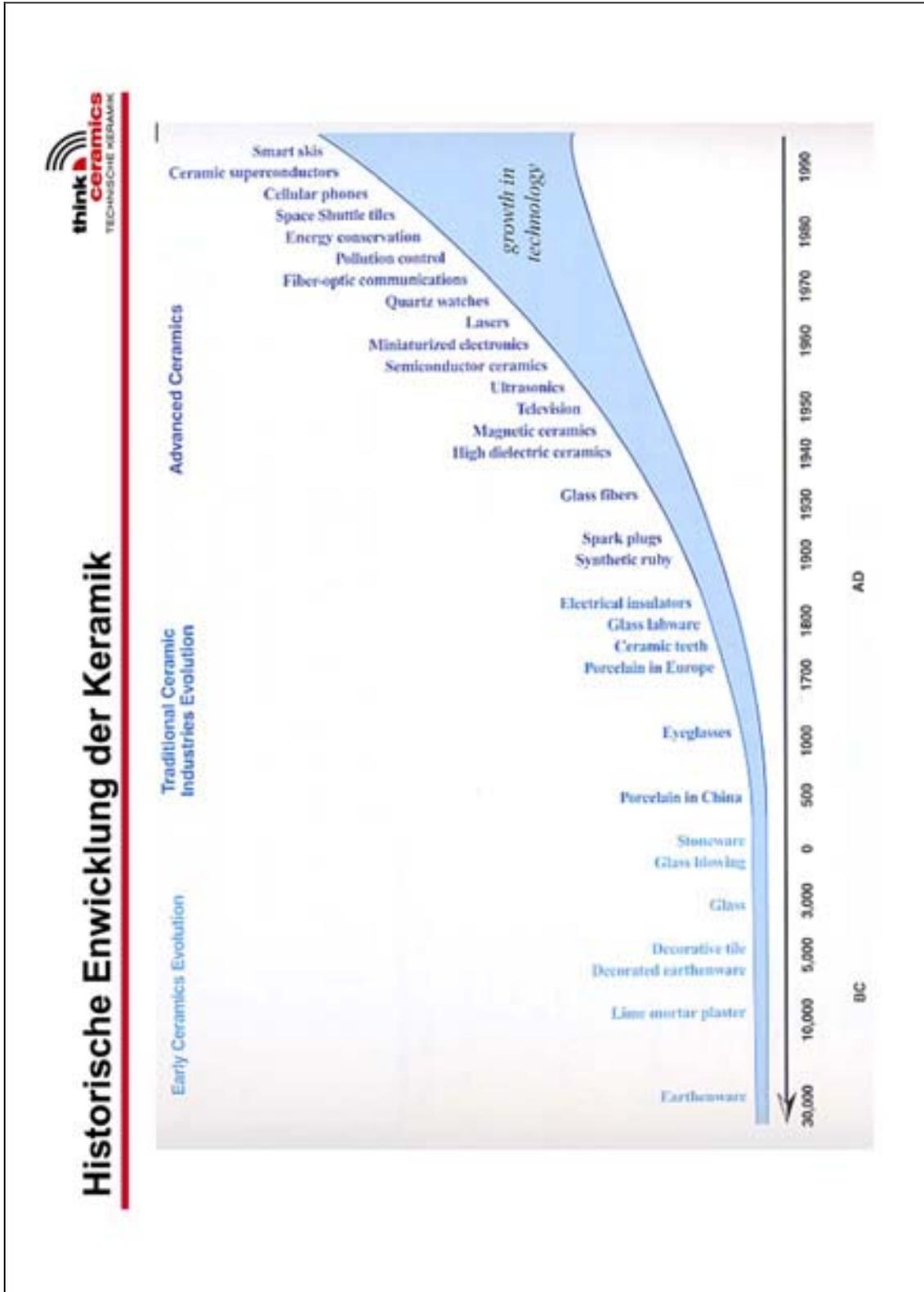
Von der Töpferware zum Space-Shuttle

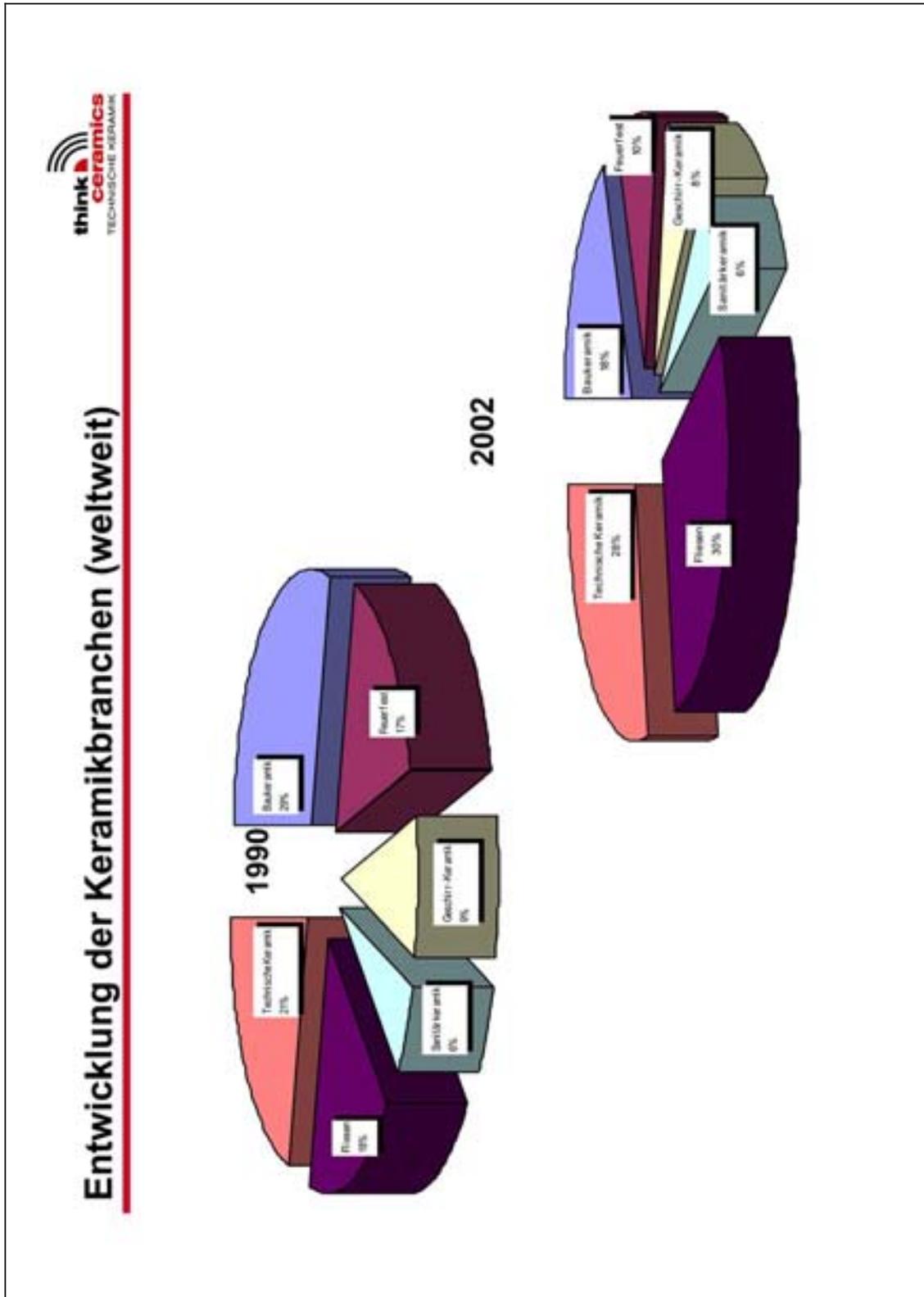


Tonskulpturen von Bisons
Frankreich
ca. 14.000 Jahre alt



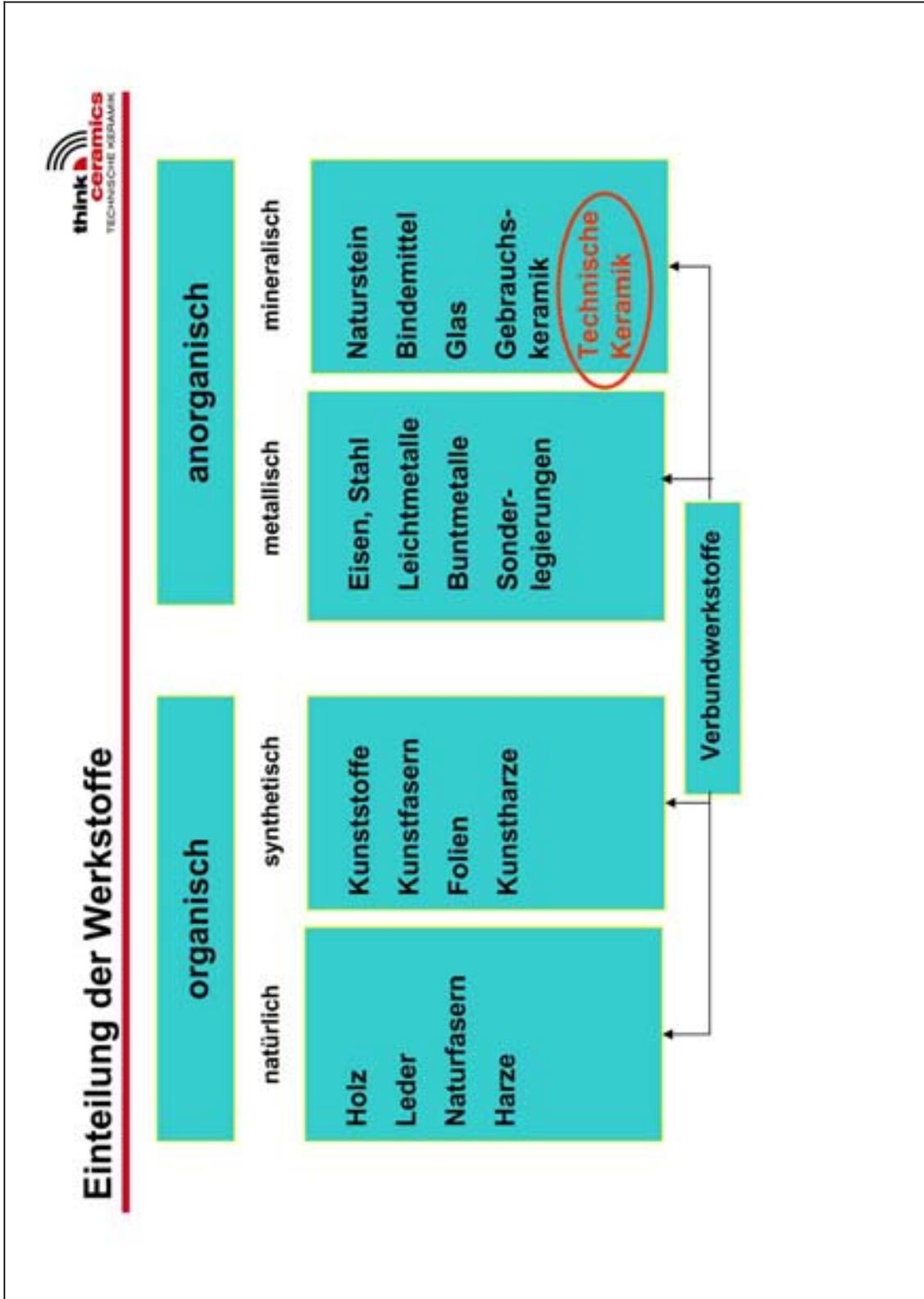
Space-Shuttle beim Start



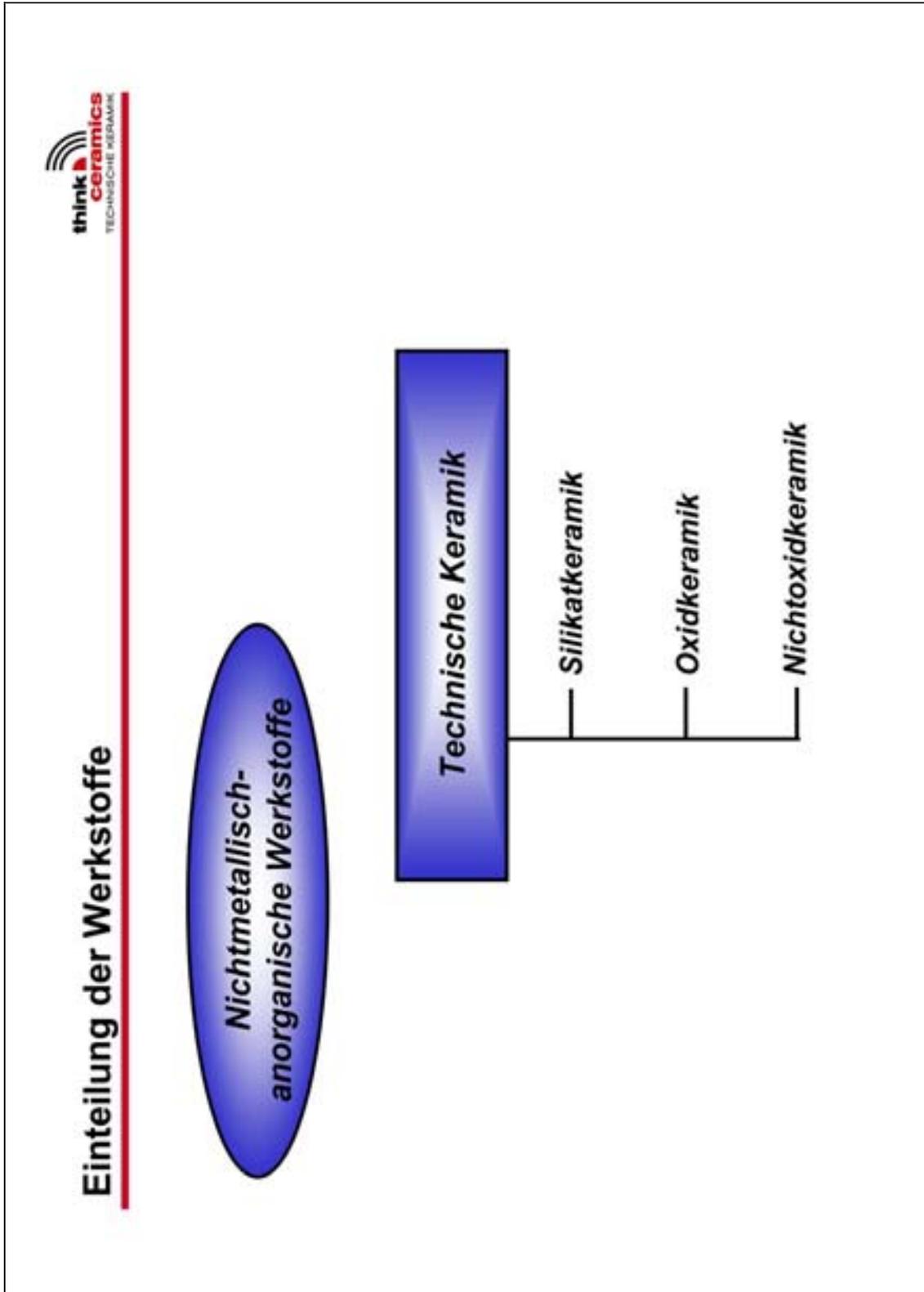


2.1 Werkstoffe - Folie 7

2. Definitionen/Nomenklatur



2.1 Werkstoffe - Folie 9





Defintionen

➤ Keramische Werkstoffe

- anorganisch/nichtmetallisch
- i. a. Formgebung bei Raumtemperatur
- typische Werkstoffeigenschaften durch Temperaturbehandlung

➤ Ceramics (angelsächsischer Sprachraum)

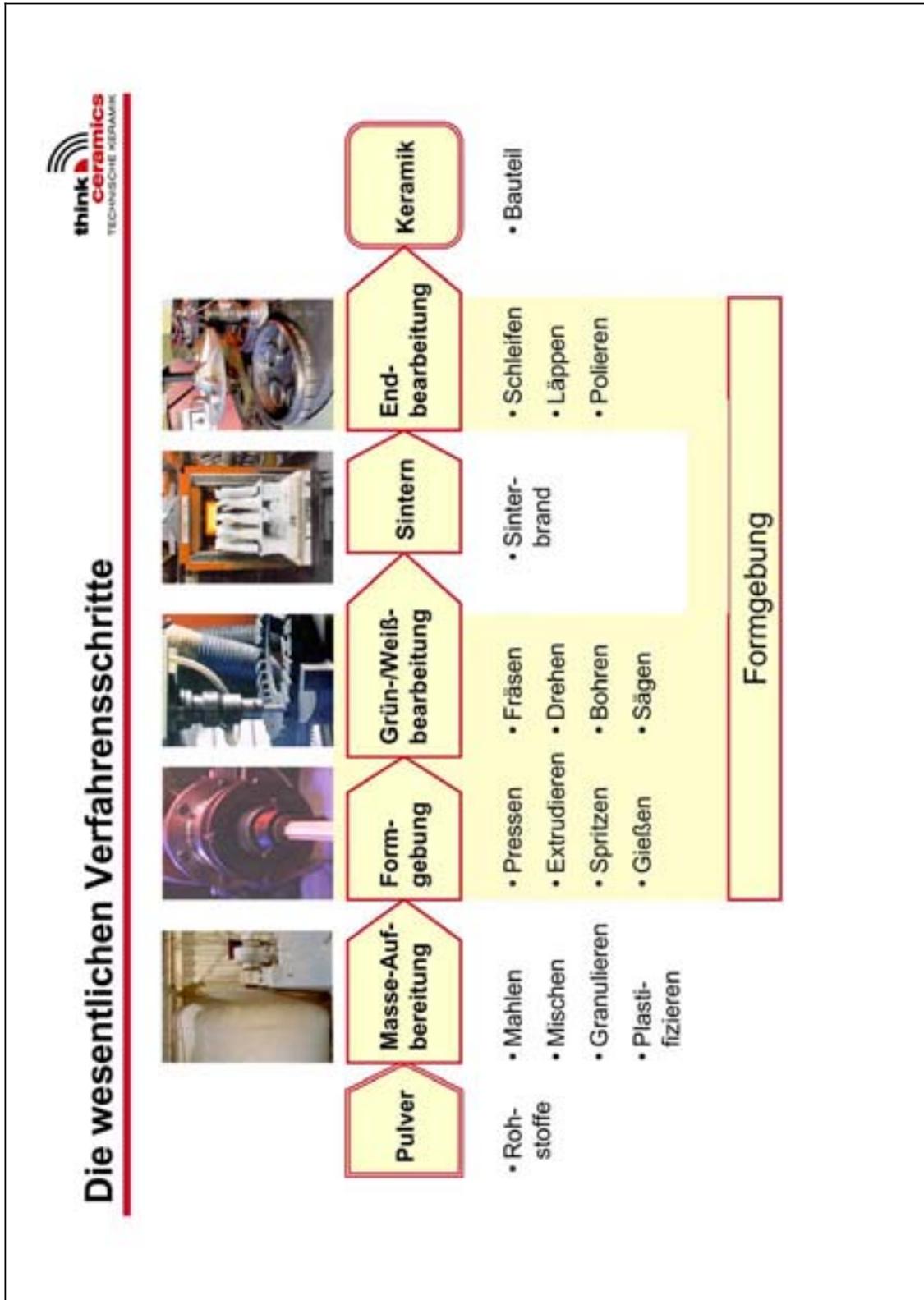
Technische Keramik



Gläser
Email

Anorg. Bindemittel (Zement, Kalk, Gips)

3. Vom Rohstoff zum Fertigprodukt



2.1 Werkstoffe - Folie 13

Versatzkomponenten bei keramischen Massen

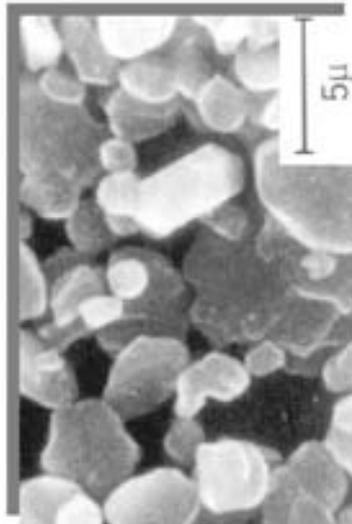
➤ Ausgangsstoffe

- natürliche Rohstoffe
- synthetische Rohstoffe

➤ Organische Hilfsstoffe

- Verflüssiger
- Binder
- Plastifizierer

➤ Sinterhilfsmittel

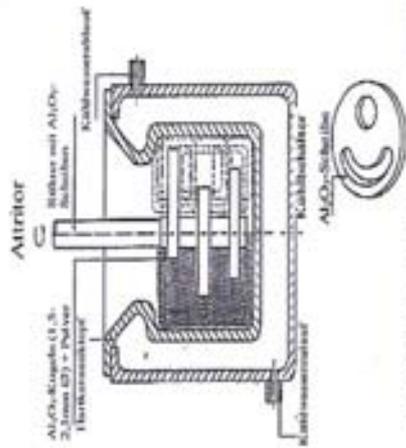


Grobes Al₂O₃- Pulver



Feines Al₂O₃-Pulver

Aufbereitung keramischer Massen



Querschnittszeichnung eines Attritors

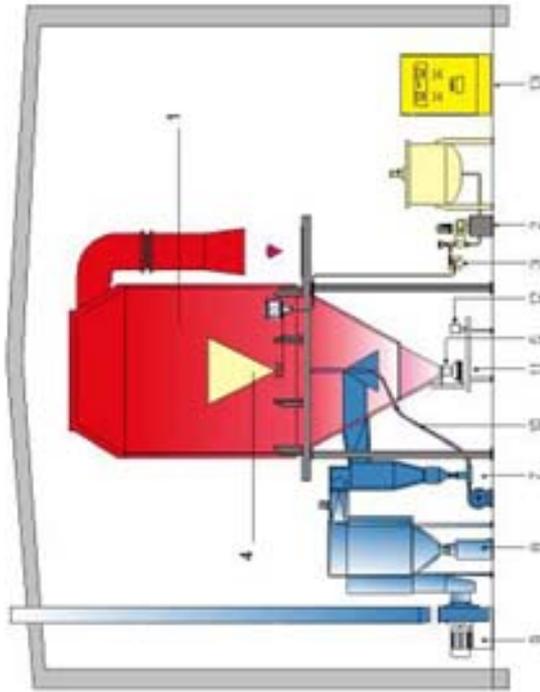
Attritormühle (schematisch)



Kugelmühle (Fa. Dorst)

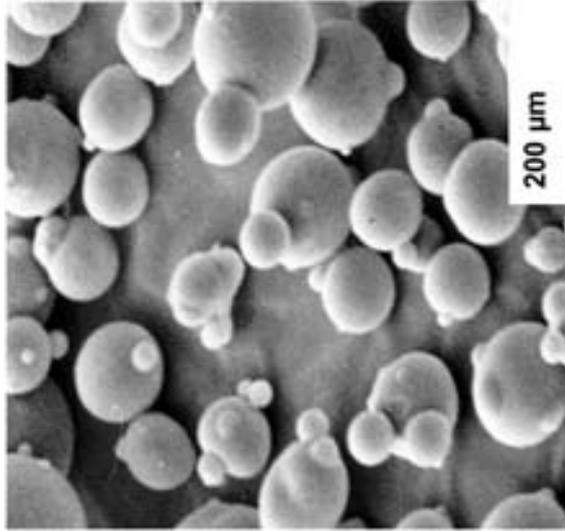
- Mischen
- Mahlen } trocken oder nass
- Entwässern
 - Filterpresse
 - Sprühtrocknung
- Aufbaugranulation

Granulatherstellung durch Sprütrocknung



Sprühaggregat (schematisch)

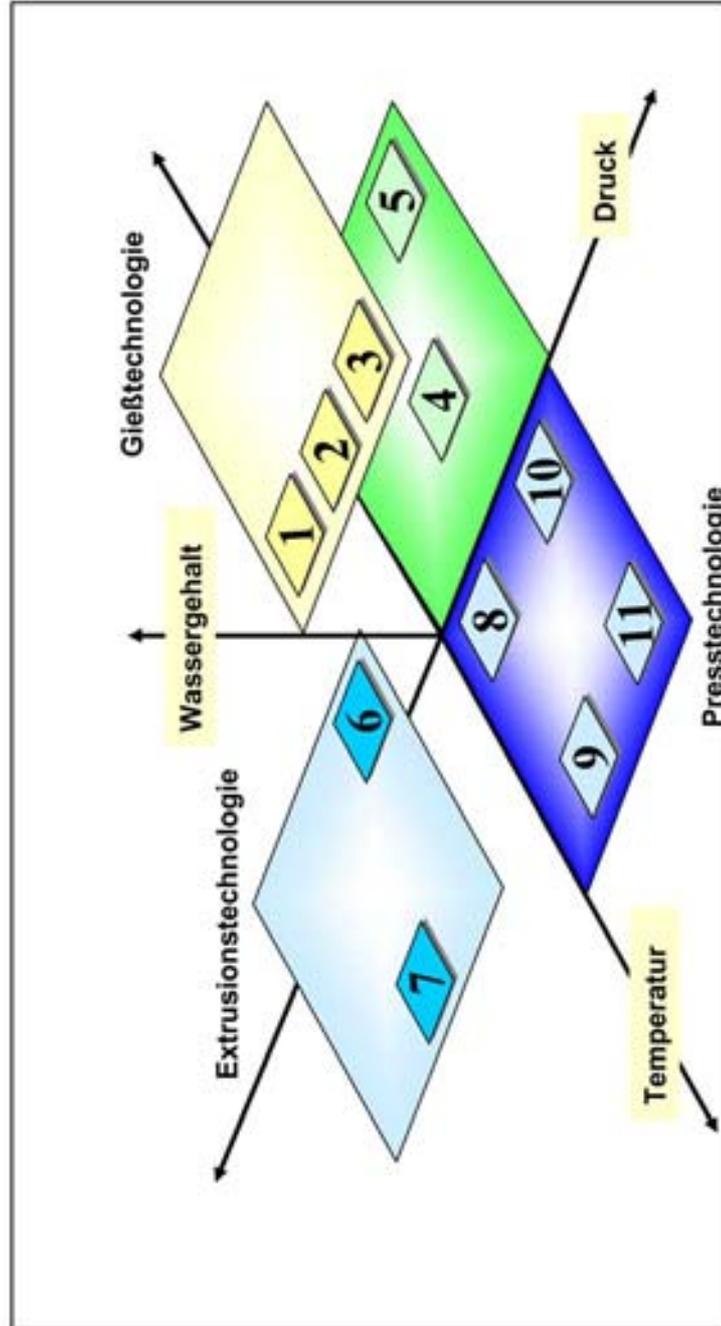
Quelle: Fa. Dorst



Sprühgranulat (Aluminiumoxid)

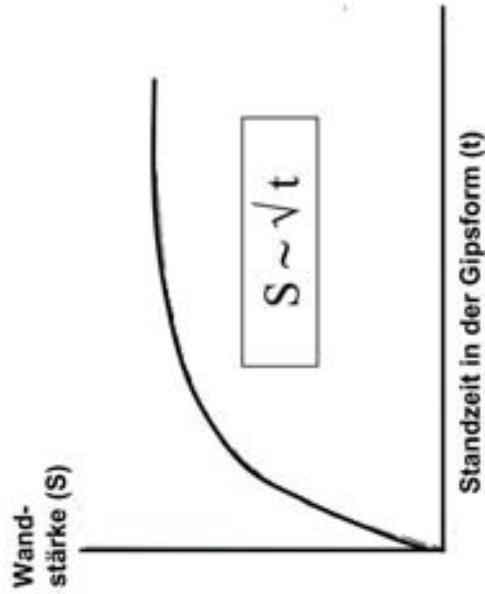
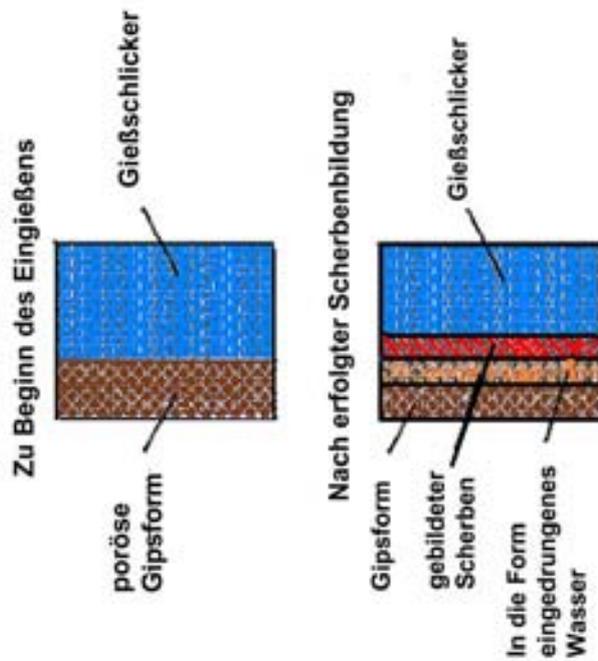
Formgebungsverfahren	
Giessen	<ul style="list-style-type: none">• Schlickergiessen• Foliengiessen
Plastisches Formen	<ul style="list-style-type: none">• Spritzgiessen• Extrudieren
Pressen	<ul style="list-style-type: none">• Uniaxiales Pressen• Isostatisches Pressen• heiß(isostatisches) Pressen
Sonstige	<ul style="list-style-type: none">• Flammspitzen• Plasmaspritzen

Formgebungsverfahren



Keramische Fertigungstechnologien in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Wassergehalt
 1= Folien gießen, 2= Form gießen, 3= Druck gießen, 4= Heiß gießen, 5= Spritz gießen,
 6= Vakuumstrangziehen, 7= Heißextrusion, 8= Axialpressen, 9= Heißpressen, 10= CIP, 11= HIP

Schlickergießen; der Scherbenbildungsprozess



Formgebung durch Schlickergießen

Vorteile

- *komplexe Bauteile darstellbar*
- *dünne Wandstärken*
- *Serienverfahren (große Stückzahlen)*

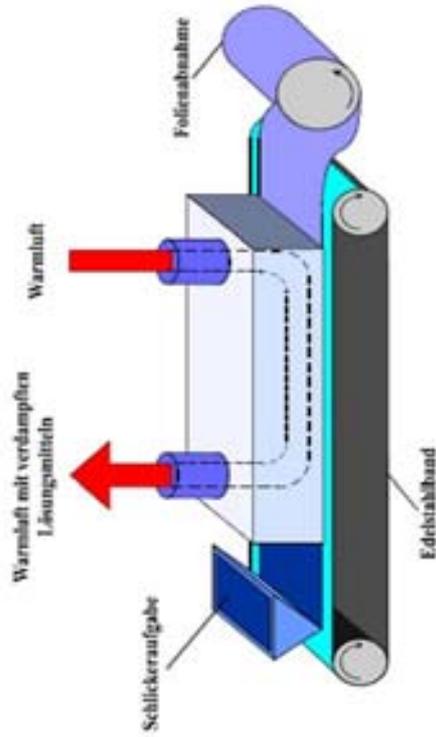
Nachteile

- *eingeschränkte Form- und Maßtoleranz (Formverschleiß)*
- *relativ raue Oberflächen*
- *komplizierte Rheologie (Gießschlicker)*
- *konstante Wandstärke bei Hohlguß*

Herstellung keramischer Folien

Foliengießen

- dünne Platten (z. B. Substrate) zur Weiterverarbeitung durch Stanzen und Lasern
- Lösungsmittel- oder wasserbasierte Suspensionen

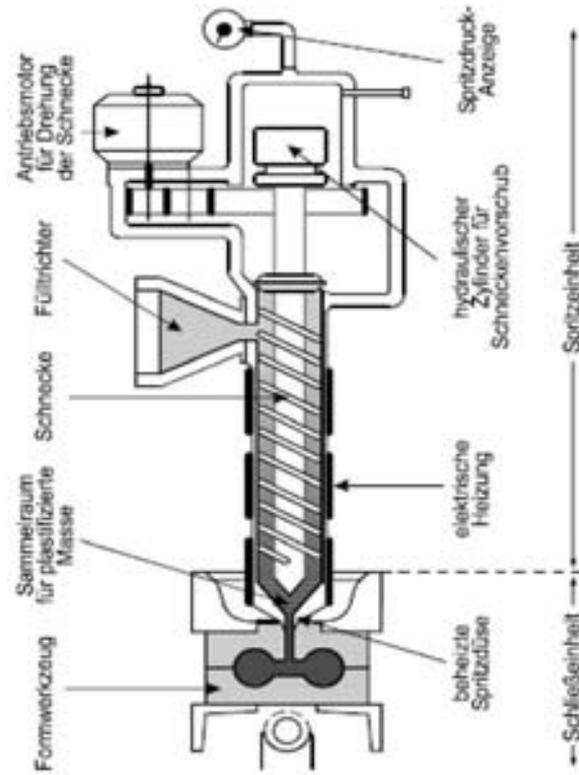


Foliengießanlage

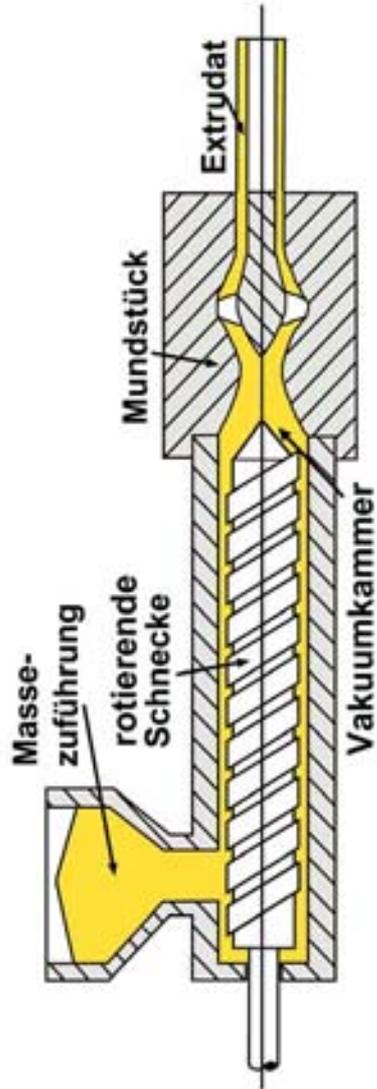
Spritzgießen keramischer Bauteile



- *sehr komplizierte Formen*
- *kleine Bauteile*
- *aufwendige Entbinderung*
- *hohe Werkzeugkosten*

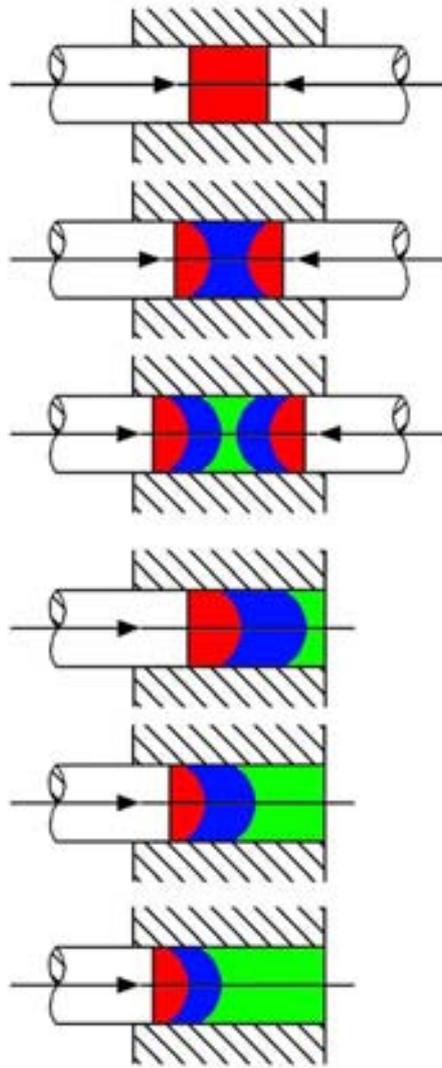


Extrudieren keramischer Stäbe und Rohre



- *wirtschaftliches Verfahren*
- *Stäbe und Rohre mit (fast) beliebigen Querschnitten*

Uniaxiales Pressen



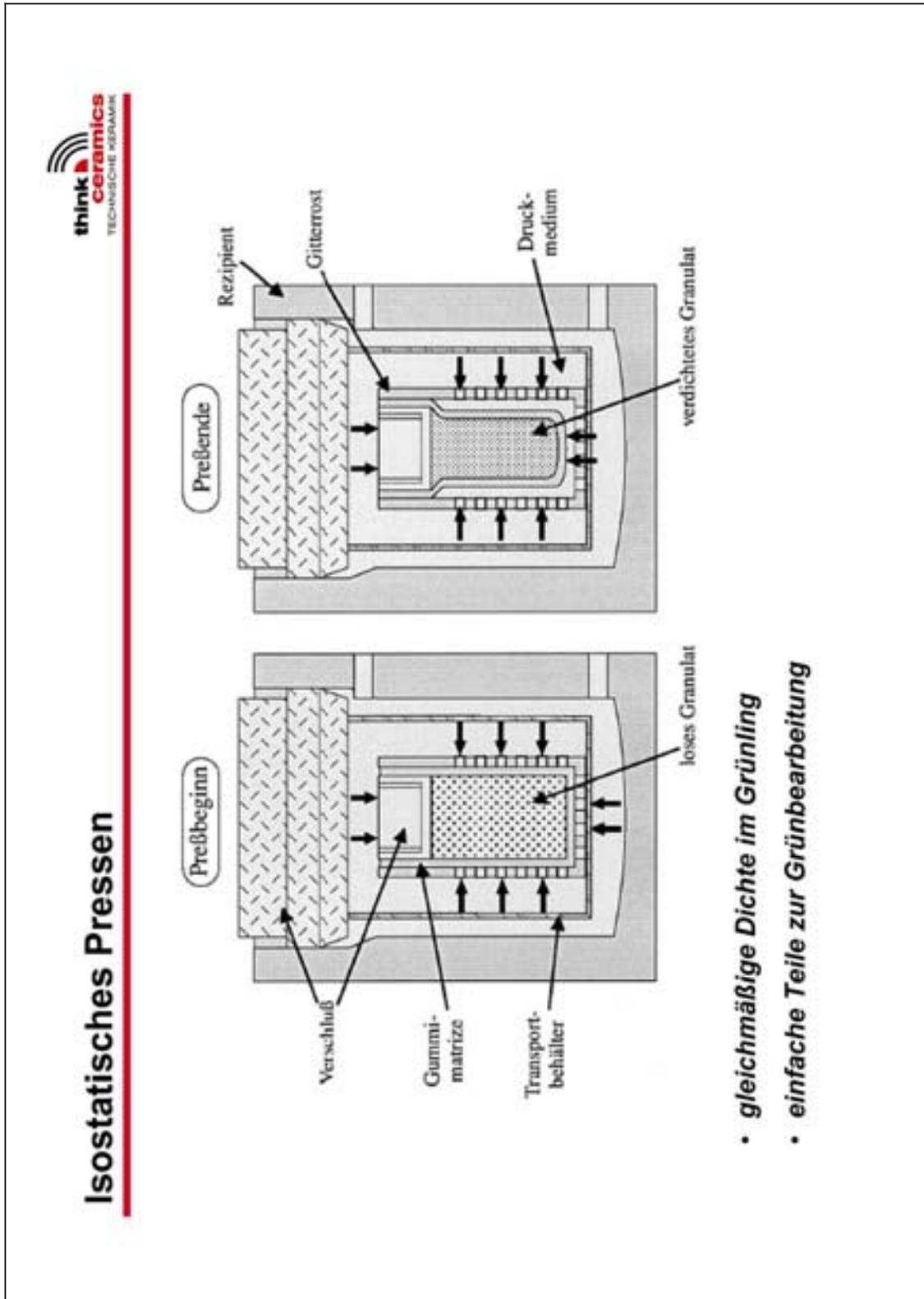
einseitig

zweiseitig



- *wirtschaftliches Verfahren*
- *einfache bis komplizierte Teile*

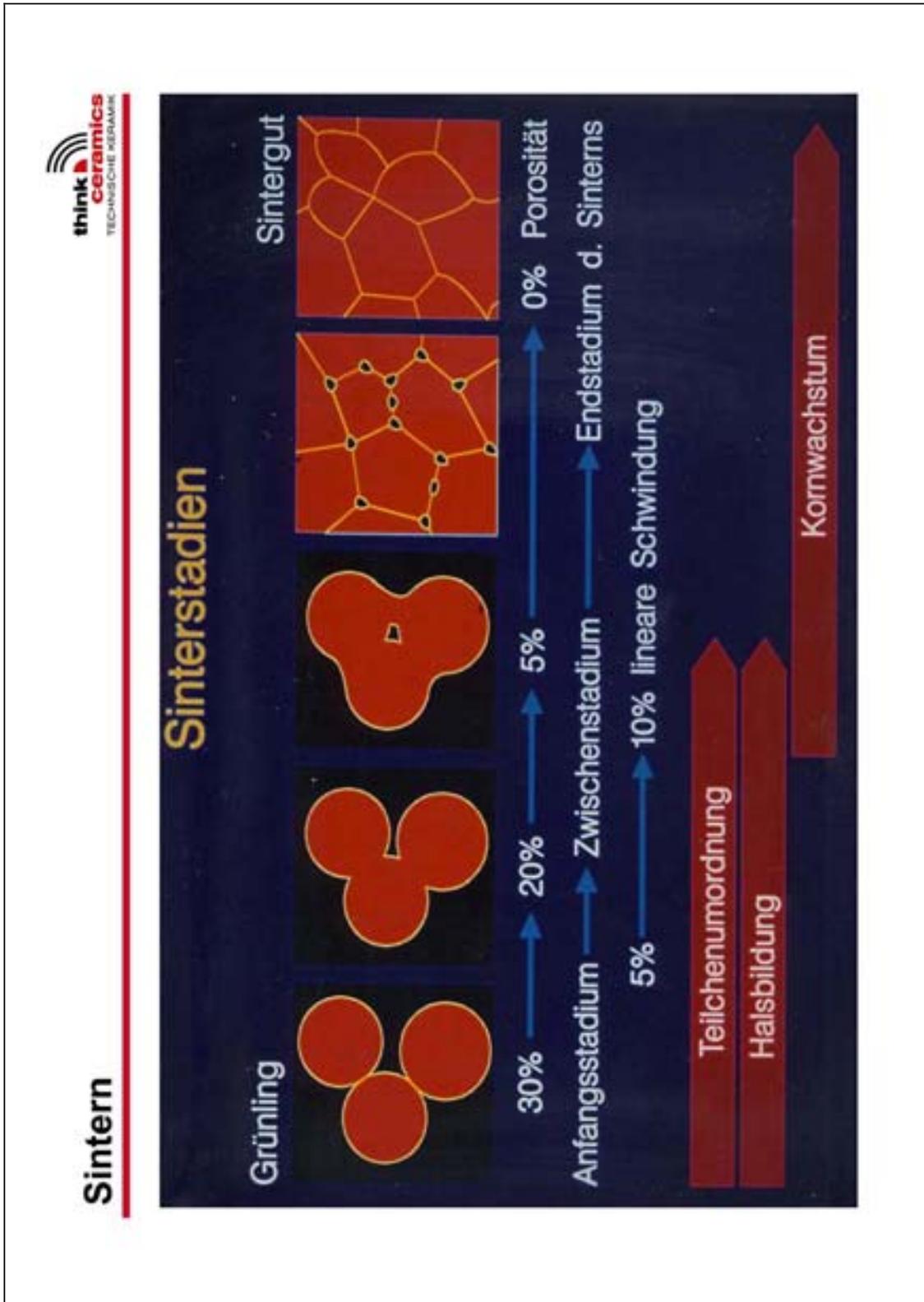
Einführung



2.1 Werkstoffe - Folie 25

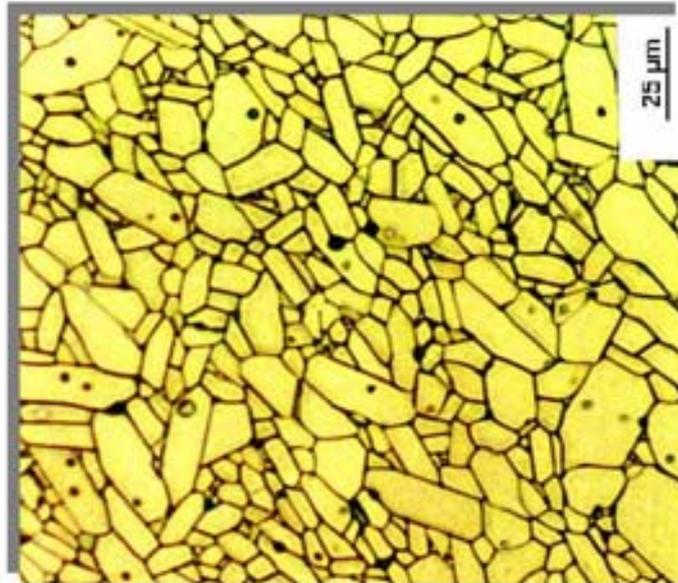
Beschichten durch Flammgespritzen



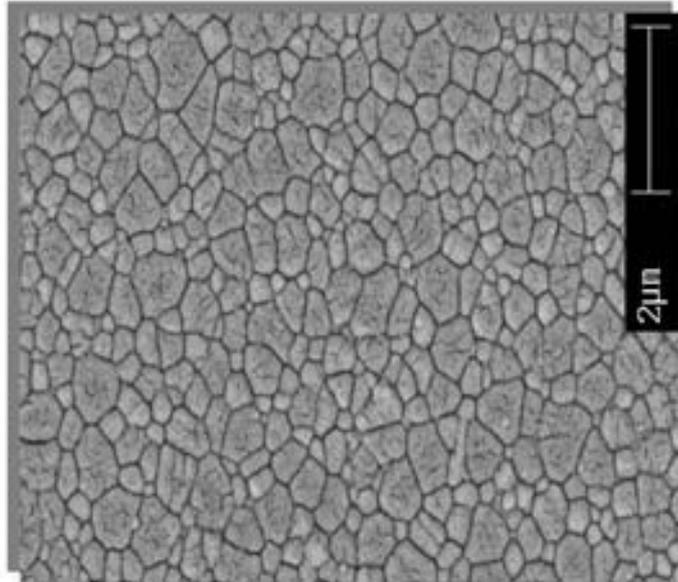


2.1 Werkstoffe - Folie 27

Gefüge von Aluminiumoxid



Gesintert bei 1700 °C

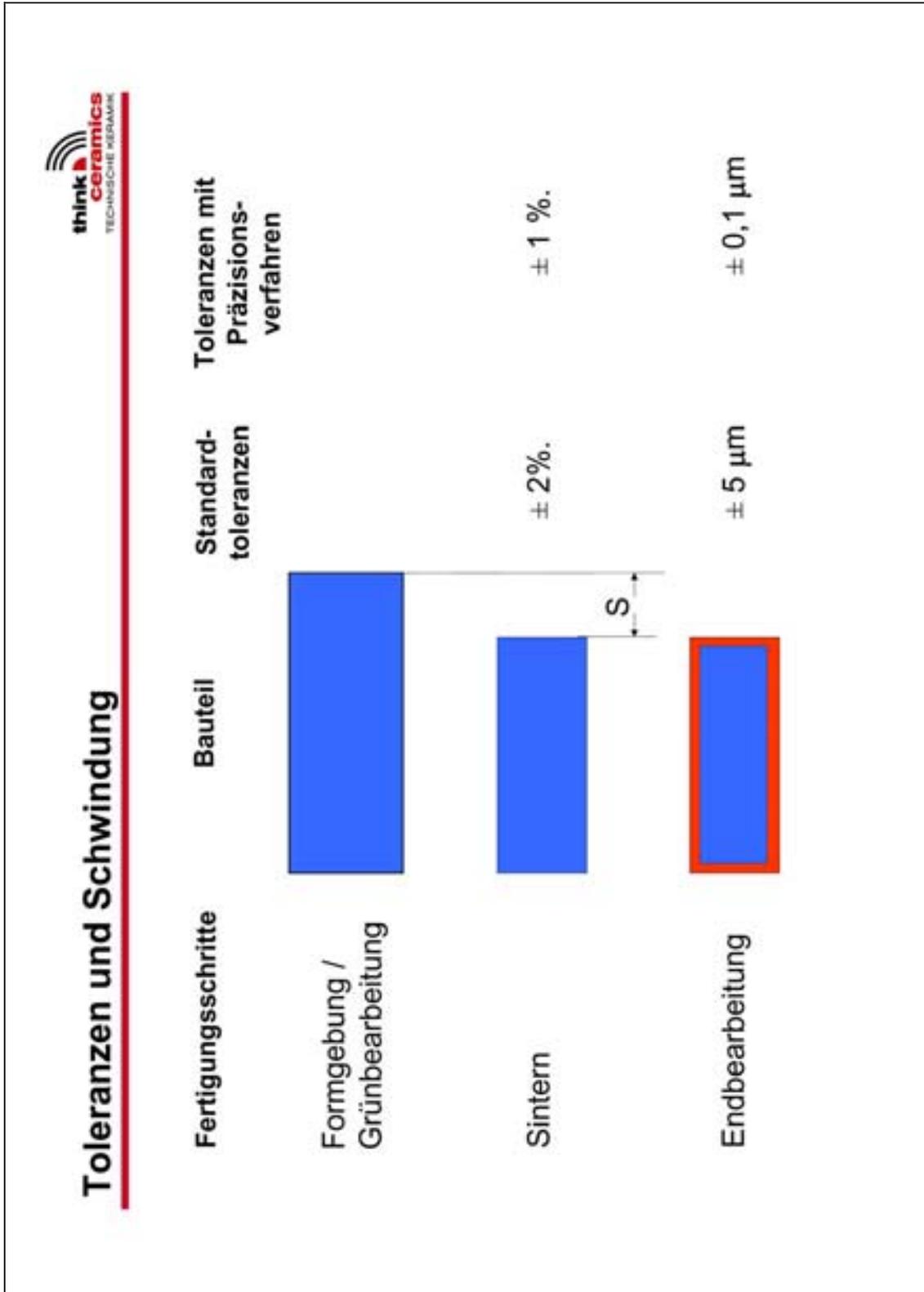


Gesintert bei 1350 °C
Heißisostatisch nachverdichtet

Sintern von technischer Keramik



- ↳ **Drucklossintern**
 - ↳ **Reaktionsintern**
 - ↳ **Schutzgassintern**
 - ↳ **Infiltrieren**
 - ↳ **Gasdrucksintern**
 - ↳ **Heißpressen**
 - ↳ **Heißisostatpressen**
-
- ↳ **Diskontinuierlich**
 - Kammeröfen
 - Herdwagenöfen
 - Haubenöfen
 - Drehherdöfen (Mikrowellensintern)
 - ↳ **Kontinuierlich**
 - Tunnelöfen
 - Rollöfen
 - Schubplattenöfen
 - Drehrohrofen
 - Bandöfen



Schwindung unterschiedlicher Werkstoffe



Werkstoff	Schwindung S
SISIC/RSIC	ca. 0 %
SSIC	18 - 20 %
poröser Cordierit	ca. 3 %
Tonerdeporzellan	ca. 13 - 16%
Al_2O_3	ca. 18%
ZrO_2	ca. 25%

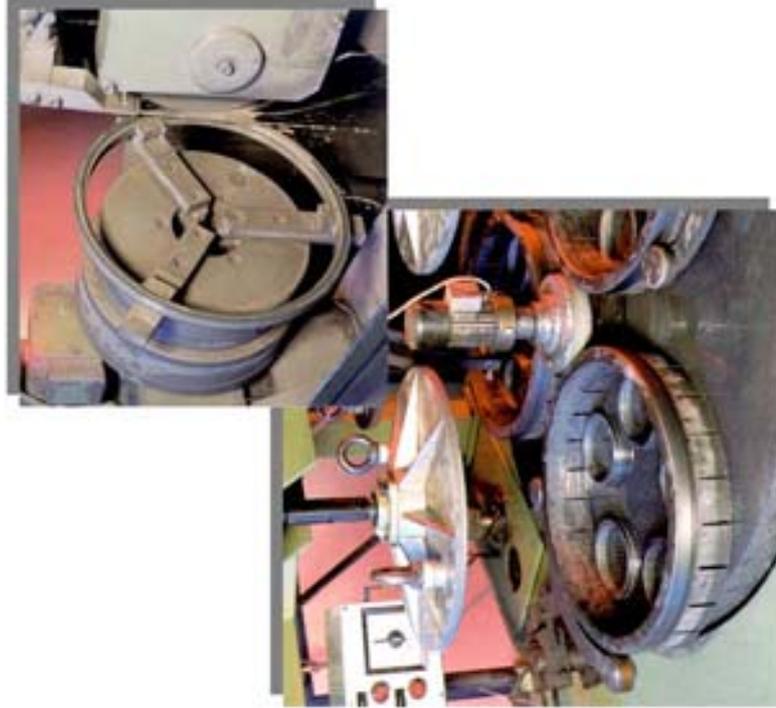
End- / Hartbearbeitung

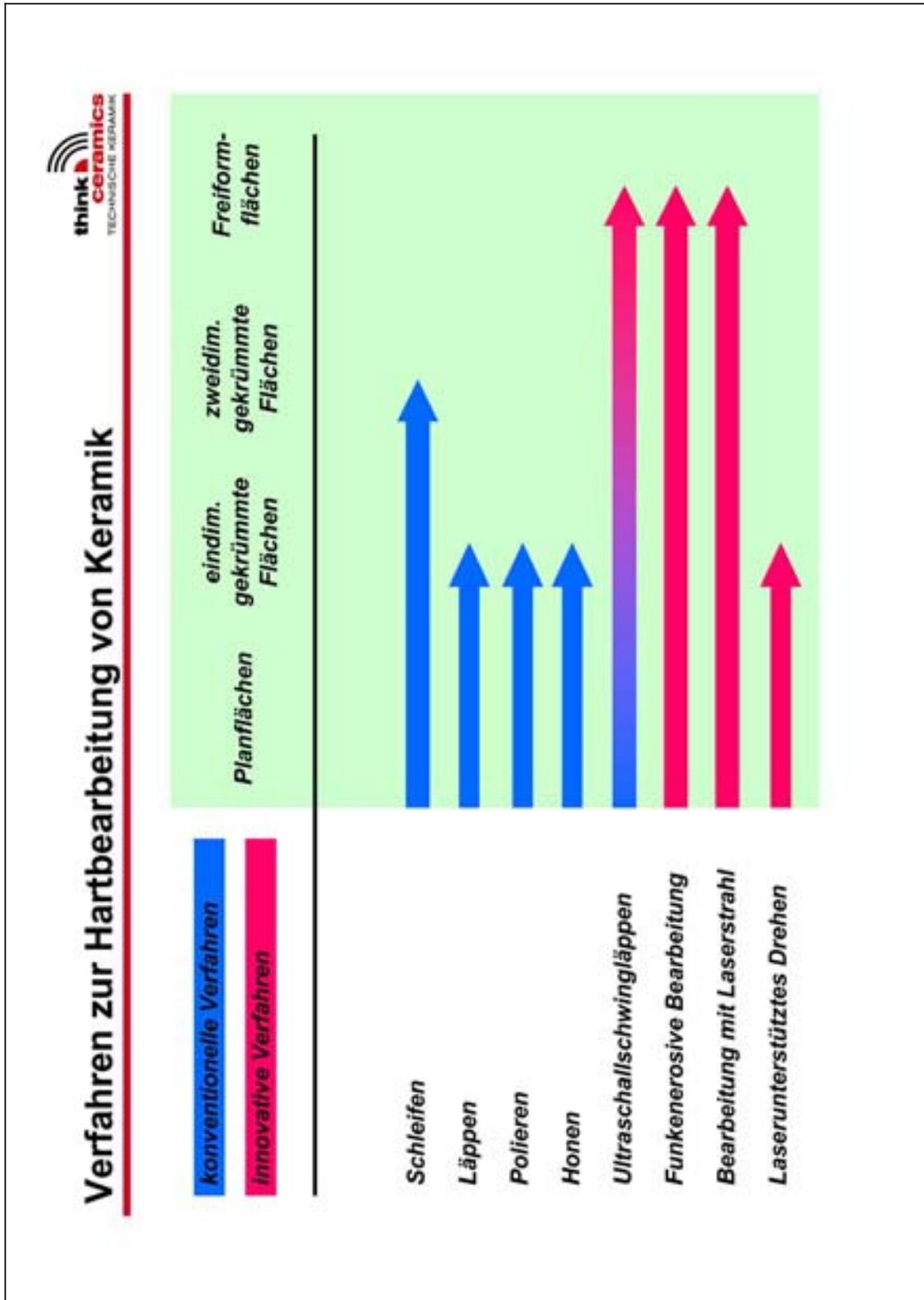
wird notwendig bei

- **erhöhten Anforderungen an die Maßgenauigkeit**
- **erhöhten Anforderungen an die Oberflächengüte**

ist verbunden mit

- **hohen Werkzeugkosten
(i. a. Diamantwerkzeugen notwendig)**
- **langen Bearbeitungszeiten**





Toleranzen bei verschiedenen Fertigungsverfahren

Herstellungsverfahren	Al_2O_3	$AlTiAl_2TiO_5$	$SiSiC/Si_3N_4$
Schlickergießen	± 2,0 %	± 2,0 %	± 2,0 %
Trockenpressen	± 1,0 %	± 1,0 %	± 0,5 %
Strangpressen	± 1,0 %	± 2,0 %	± 1,5 %
Spritzguß	± 0,5 %	± 0,5 %	± 0,5 %
Isostatisches Pressen	± 0,2 %	± 0,5 %	± 0,2 %
Grünbearbeitung	± 0,1 %	± 0,5 %	± 0,1 %

Der Hauptanteil der notwendigen Toleranz ist auf Verzug beim Brennprozeß zurückzuführen.



Erreichbare Toleranzen durch Hartbearbeitung

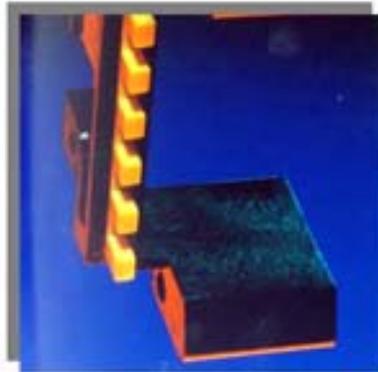
Maße	<i>bis 50 mm</i>	<i>50 - 100 mm</i>
Außenmaße	$\pm 0,005 \text{ mm}$	$\pm 0,010 \text{ mm}$
Höhe	$\pm 0,02 \text{ mm}$	$\pm 0,03 \text{ mm}$
Innendurchmesser	$\pm 0,005 \text{ mm}$	$\pm 0,01 \text{ mm}$
Rundheit	$< 0,003 \text{ mm}$	$< 0,005 \text{ mm}$
Ebenheit	$0,0003\text{-}0,009 \text{ mm}$	$0,0006\text{-}0,0009 \text{ mm}$
Oberflächengüte R_a	$0,02 \text{ }\mu\text{m}$ (mindestens)	

Mögliche Arten der Verbindungstechnik



Die Verbindung kann sein

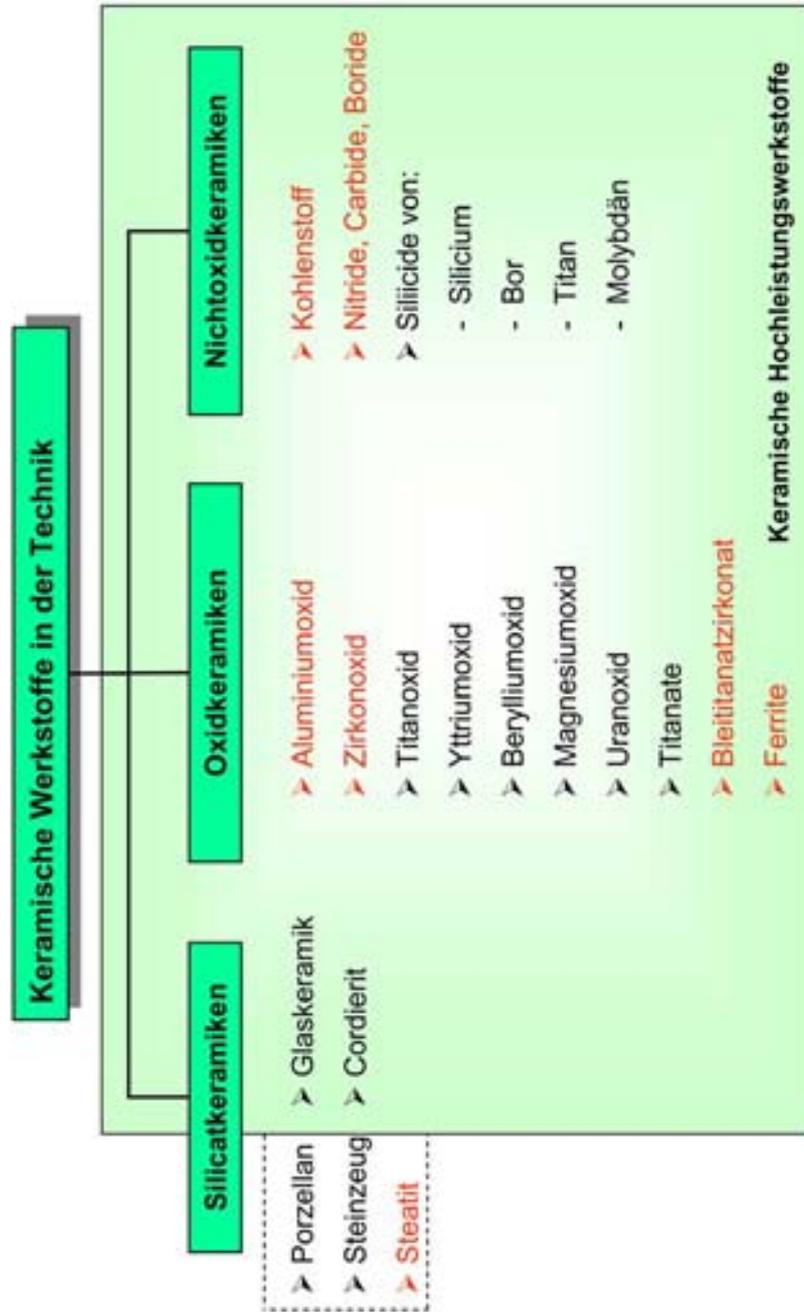
- *stoffschlüssig*
(löten, schweißen, kleben, einsintern)
- *kraftschlüssig*
(klemmen, stecken, nieten) oder
- *formschlüssig*
(eingießen, schrumpfen, umspritzen)





4. Die wichtigsten Werkstoffgruppen

Werkstoffübersicht



Silikatkeramik – Typische Werkstoffdaten

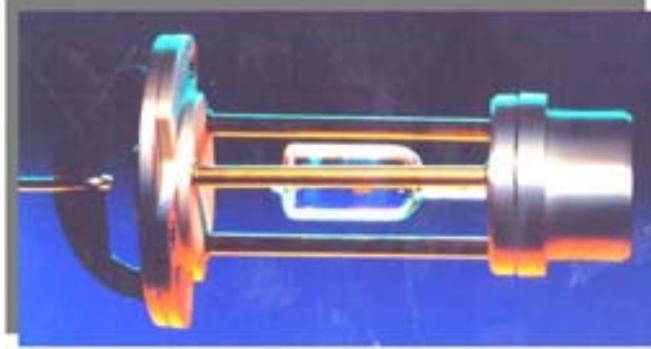
Eigenschaften	Dimension	Technisches Porzellan	Steatit (Mg-Silikat)	Cordierit (Erdalkali-Aluminiumsilikat)	Mullitkeramik (Al-Silikat)
offene Porosität	Vol.-%	0	0 35	0,5	0
Dichte	g/cm ³	2,2 – 2,6	1,8 – 2,8	2,1 – 2,7	2,6 – 2,8
Biegefestigkeit	MPa	60 – 160	30 – 140	60 – 100	150
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	1 – 4	1 – 4	1 – 8	2 – 15
WAK	10 ⁻⁶ K ⁻¹	4 – 8	6 – 11	2 – 6	5 – 7
Max. Einsatztemperaturen	°C	-	1000 – 1200	(-) 1200	1200
Spezifischer elektrischer Widerstand	Ωm	10 ¹¹	10 ¹⁰ - 10 ¹¹	10 ¹⁰ - 10 ¹²	10 ¹¹

Steatit – Wichtige Merkmale

- *gute Festigkeit auch bei höheren Temperaturen*
- *Temperaturwechselbeständigkeit*
- *gute dielektrische Eigenschaften*
- *niedriger Verlustfaktor*
- *komplizierte Bauteile machbar*



Socket und Fassungen



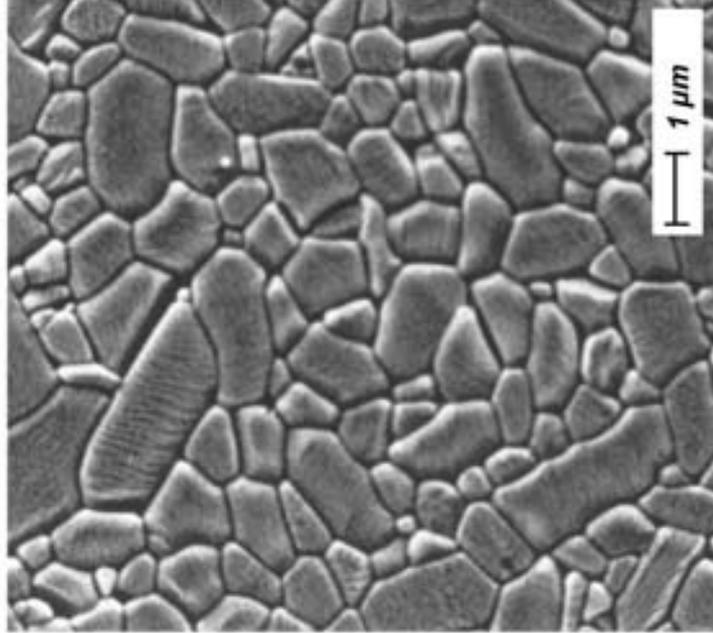
Lampenfassung,
vernietet

Oxid-Keramik – Typische Werkstoffdaten

Eigenschaften	Dimension	Aluminium-oxid 95 - 99%	Aluminium-oxid > 99%	Teilstabilisiertes Zirkonoxid	Aluminium- titanat
offene Porosität	Vol.-%	0	0	0	10 - 16
Dichte	g/cm ³	3,5	3,9	5 - 6	3,0 - 3,7
Biege- festigkeit	MPa	280	300 - 600	500 - 1000	20 - 100
Wärmeleit- fähigkeit	W/mK	16 - 28	19 - 30	1,5 - 3	2
WAK	10 ⁻⁶ K ⁻¹	6 - 8	6 - 8	10 - 12	0,5 - 2
Max. Einsatz- temperaturen	°C	1500	1700	1600	900 - 1600
Spezifischer elektrischer Widerstand	Ωm	10 ¹²	10 ¹²	10 ⁸ - 10 ¹³	10 ¹⁴

Aluminiumoxid – Wichtige Merkmale

- *Elektrischer Isolator*
- *Werkstoff mit hoher Härte*
 - *mechanische Festigkeit*
 - *Verschleißfestigkeit*
- *Chemische Beständigkeit*
 - *Korrosion*
 - *Alterung*
 - *Lebensmittelechtheit*
 - *Körperverträglichkeit*
- *Relativ gute Wärmeleitfähigkeit*
- *Lötbar Keramik (Metallisierung)*



Gefüge Aluminiumoxid

Zirkonoxid – Wichtige Merkmale



- *Extrem hohe Festigkeit und Reißfähigkeit (insbes. TZP)*
- *Wärmeausdehnung ähnlich Stahl (⇔ Verbindungstechnik!)*
- *Sehr niedriges Wärmeleitvermögen*
- *Sauerstoffionenleiter (λ -Sonde)*



Polykristallines tetragonales Zirkonoxid

Wichtige nichtoxidische keramische Werkstoffe

Grundlage	Bezeichnung	Kurzbezeichnung
Siliciumcarbid (SiC)	Silikatisch gebundenes SiC	RSIC
	rekristallisiertes SiC	NSIC
	nitridisch gebundenes SiC	SISIC
	siliciuminfiltriertes SiC	SSIC
	gesinterter SiC	HPSIC
	heißgepresstes SiC	HIPSIC
Siliciumnitrid (Si ₃ N ₄)	reaktionsgebundenes Si ₃ N ₄	RBSN
	gesinterter Si ₃ N ₄	SSN
	heißgepresstes Si ₃ N ₄	HPSN
	heißisostatisch gepresstes Si ₃ N ₄	HIPSN
	gasdruckgesinterter Si ₃ N ₄	GPSN
AlN	Aluminiumnitrid	AN
B ₄ C	Borkarbid	BC

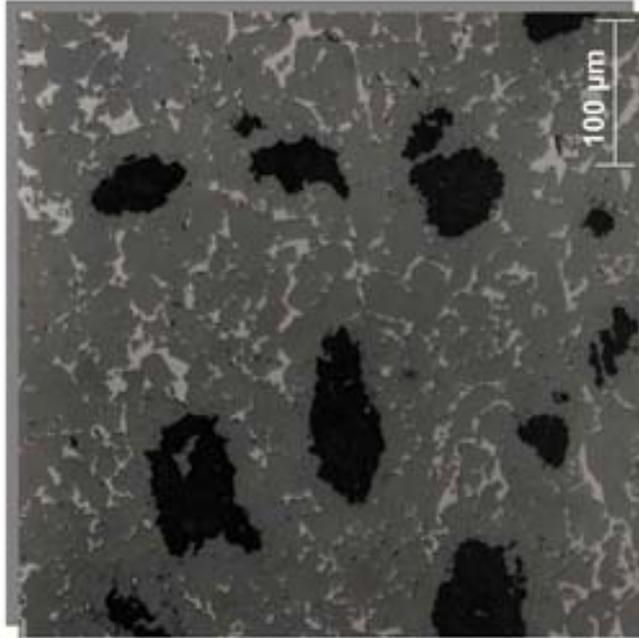
Siliciumcarbid-Keramik – Typische Werkstoffdaten

Eigenschaften	Dimension	SSIC	SISIC	RSIC	LPSIC
offene Porosität	Vol.-%	0	0	10 – 15	< 1
Dichte	g/cm ³	3,08 – 3,15	3,05 – 3,12	2,7	3,2
Biegefestigkeit	MPa	300 – 500	200 – 450	80 – 120	600
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	40 – 120	100 – 160	18 – 20	100
WAK	10 ⁻⁶ K ⁻¹	4,0 – 4,8	4,0 – 4,8	4,8	4,1
Max. Einsatztemperaturen	°C	1400 - 1750	1350	1600	1200 – 1400
Spezifischer elektrischer Widerstand	Ωm	10 ³ - 10 ⁴	10 ¹ - 10 ³	-	10 ¹

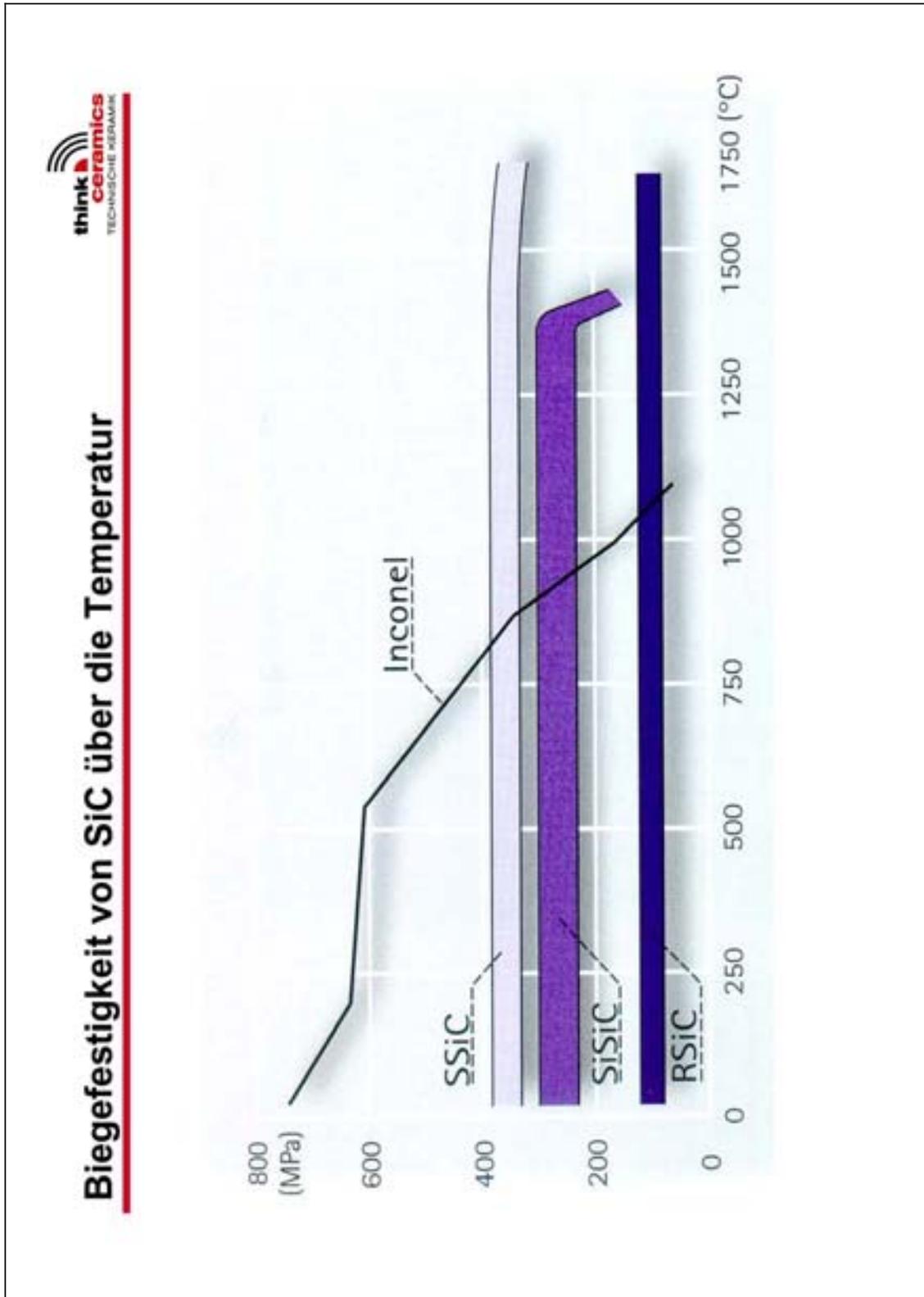
Siliciumcarbid – Wichtige Merkmale



- **Härte/Verschleißfestigkeit**
- **Hohe Wärmeleitfähigkeit**
- **Hochtemperaturbeständigkeit**
- **Chemische Beständigkeit**



Siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid
mit Kohlenstoffeinlagerungen (CSiSiC)



2.1 Werkstoffe - Folie 47

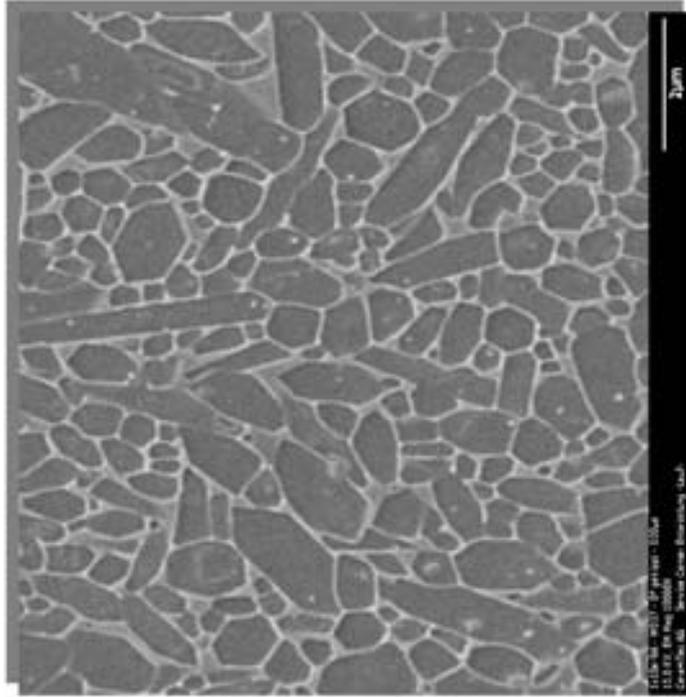
Nitrid-Keramik – Typische Werkstoffdaten

Eigenschaften	Dimension	SSN	HIPSN	RBSN	BN	AlN
offene Porosität	Vol.-%		0		0	0
Dichte	g/cm ³	3,2 - 3,3	3,2 - 3,3	1,9 - 2,5	2,0 - 2,1	3,0 - 3,3
Biege- festigkeit	MPa	700 - 1000	800 - 1100	200 - 330		200 - 350
Wärmeleit- fähigkeit	W/mK	15 - 40	15 - 50	4 - 15	< 1	180 - 220
WAK	10 ⁻⁶ K ⁻¹	2,5 - 3,5	3,1 - 3,3	2,1 - 3,0	2,2 - 4,4	4,5 - 5,6
Max. Einsatz- temperaturen	°C	1300	1400	1400	800 - 1000	1000
Spezifischer elektrischer Widerstand	Ωm	10 ¹¹	10 ¹³	10 ¹³		10 ¹³

Siliciumnitrid – Wichtige Merkmale



- **Sehr hohe Festigkeit und Härte**
(⇒ **Verschleißbeständigkeit**
auch bei hohen Temperaturen)
- **Hohe Anwendungstemperaturen**
- **Sehr gute Temperaturwechsel-**
beständigkeit
- **Gute chemische Beständigkeit**



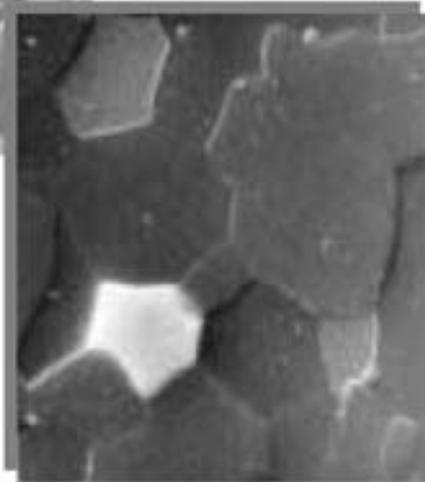
Gefüge Siliciumnitrid

Aluminiumnitrid – Wichtige Merkmale

- *sehr hohe Wärmeleitfähigkeit*
- *hohes elektrisches Isolationsvermögen*
- *thermische Ausdehnung ähnlich Si*



AlN-Oberfläche:
as-fired

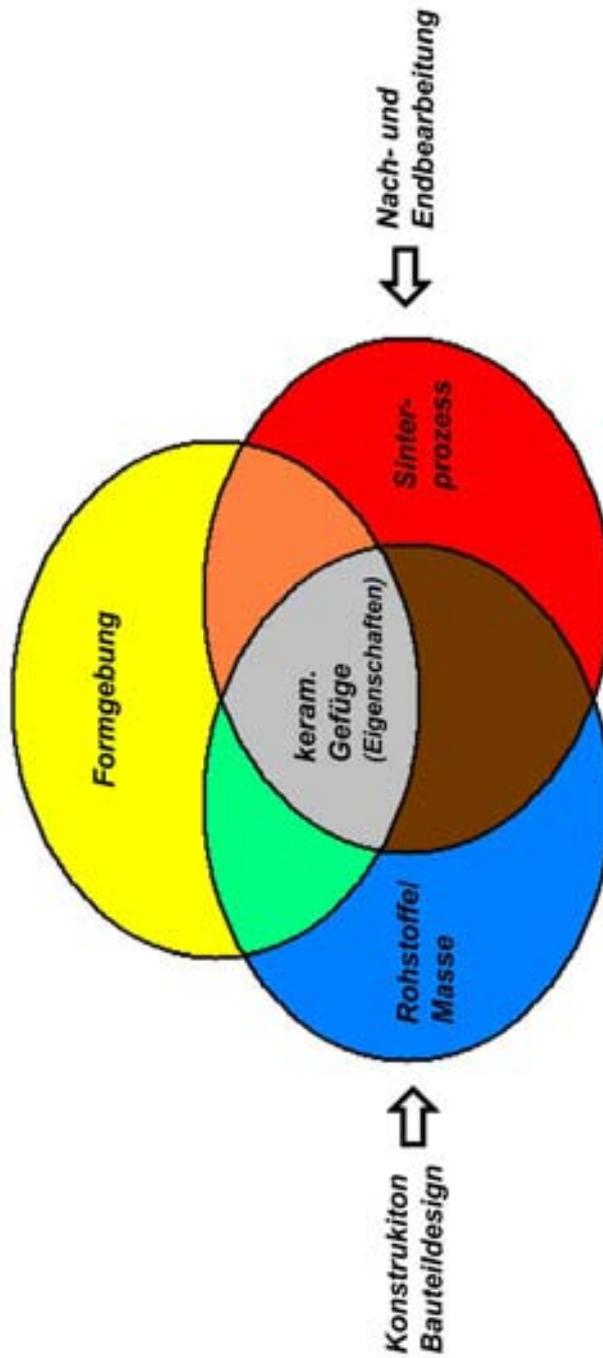


AlN-Oberfläche:
poliert

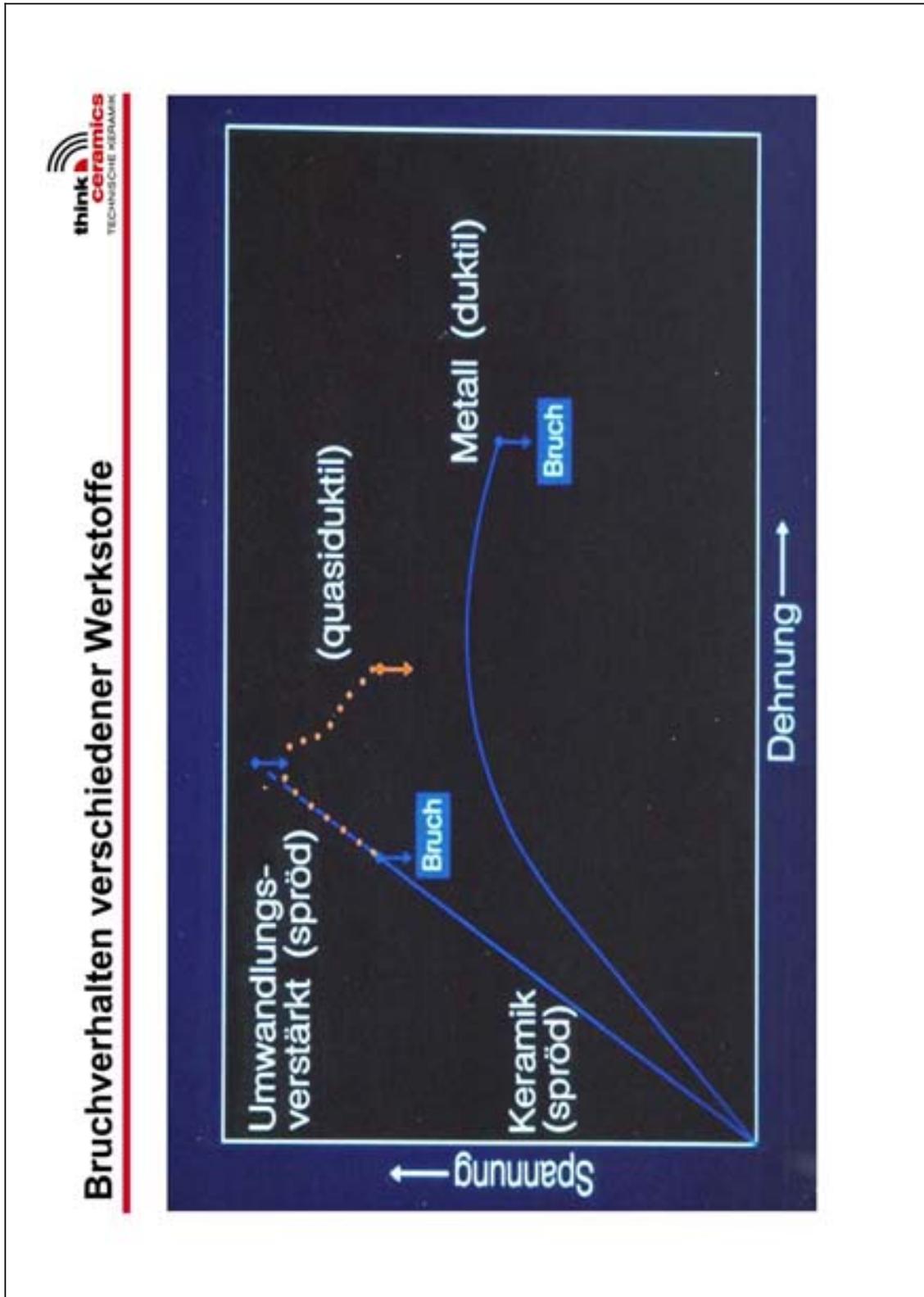


5. Typische Eigenschaftsmerkmale

Eigenschaften keramischer Werkstoffe



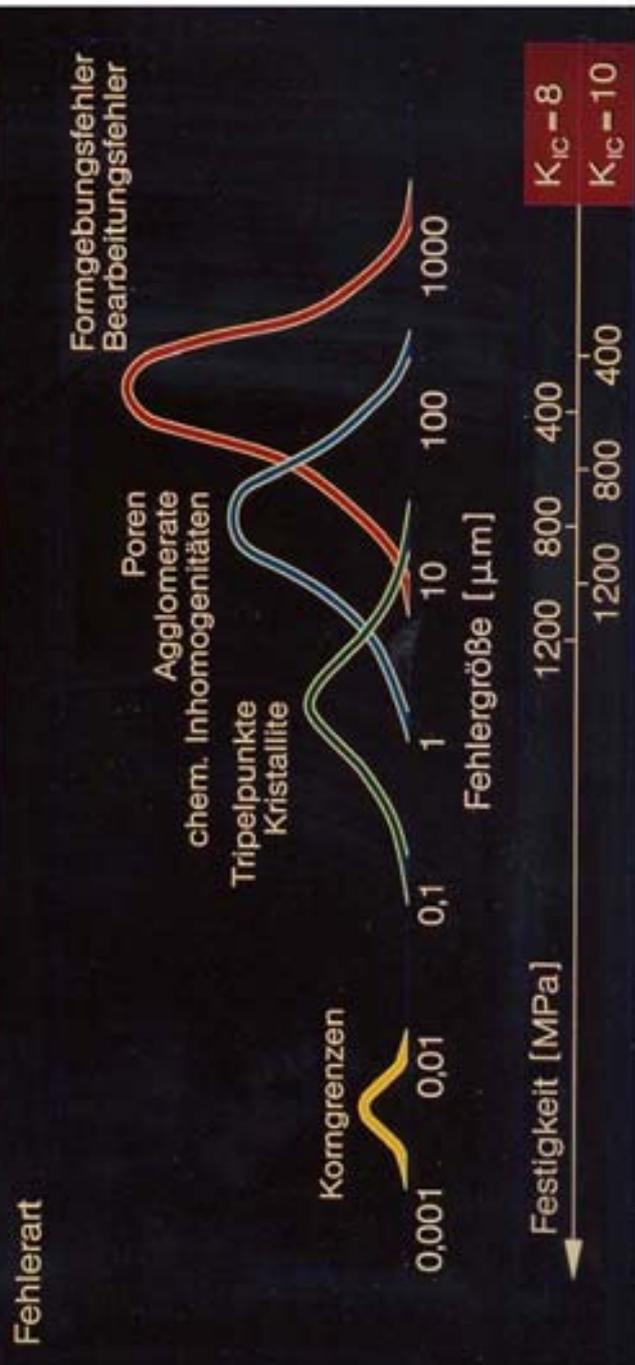
Die Eigenschaften keramischer Werkstoffe werden im wesentlichen durch die Ausgangskomponenten, die Formgebung und durch den Sinterprozess bestimmt.



2.1 Werkstoffe - Folie 53

Versagenswahrscheinlichkeit

Versagenswahrscheinlichkeit von keramischen Werkstoffen



Hochemperatur-Applikationen: Negativbeispiele



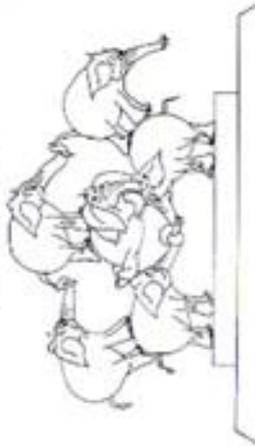
Kette aus Aluminiumoxid-Gliedern



Schraube und Mutter aus Aluminiumoxid

Mechanische Beanspruchung von Keramikteilen

COMPRESSION

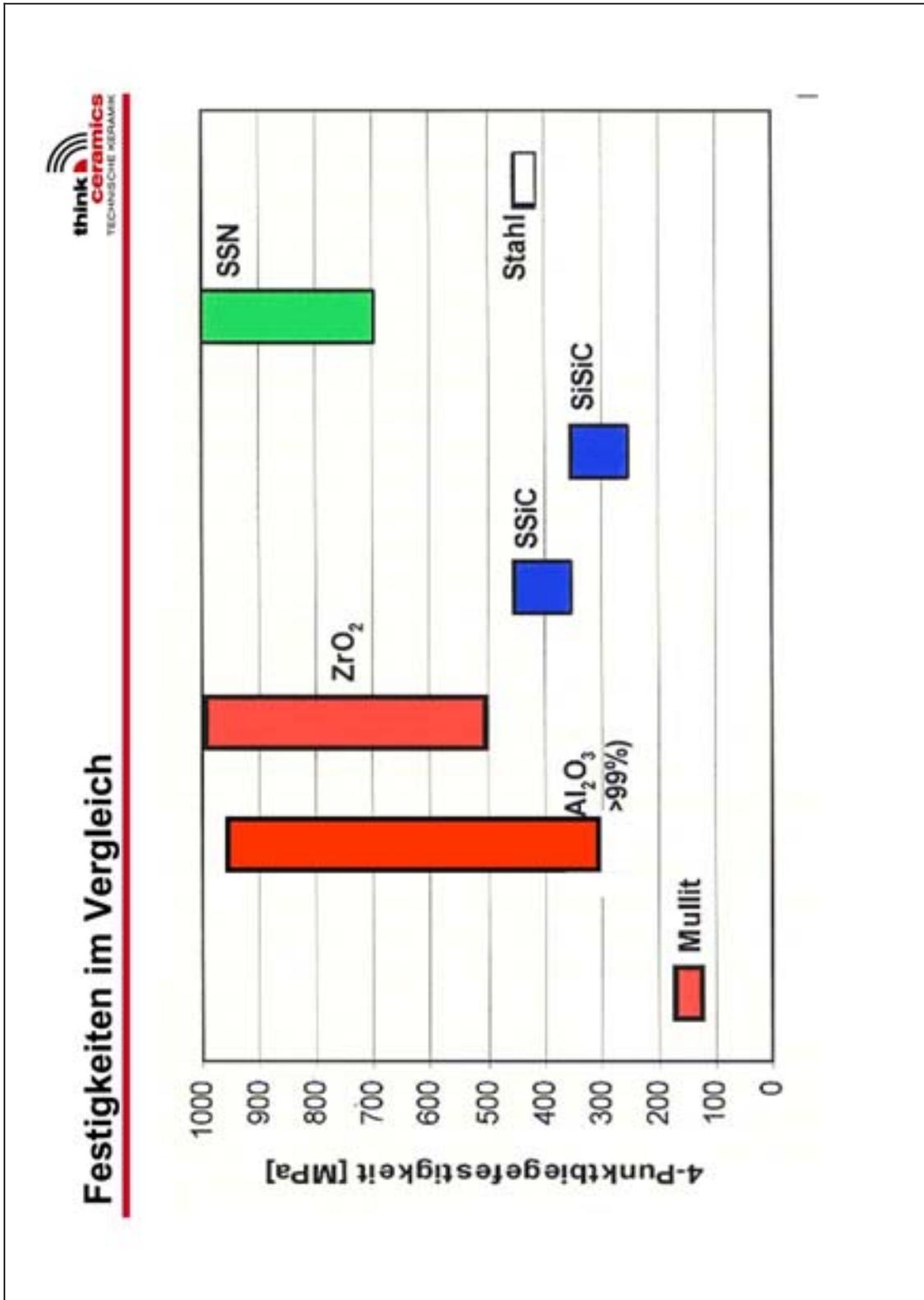


BENDING

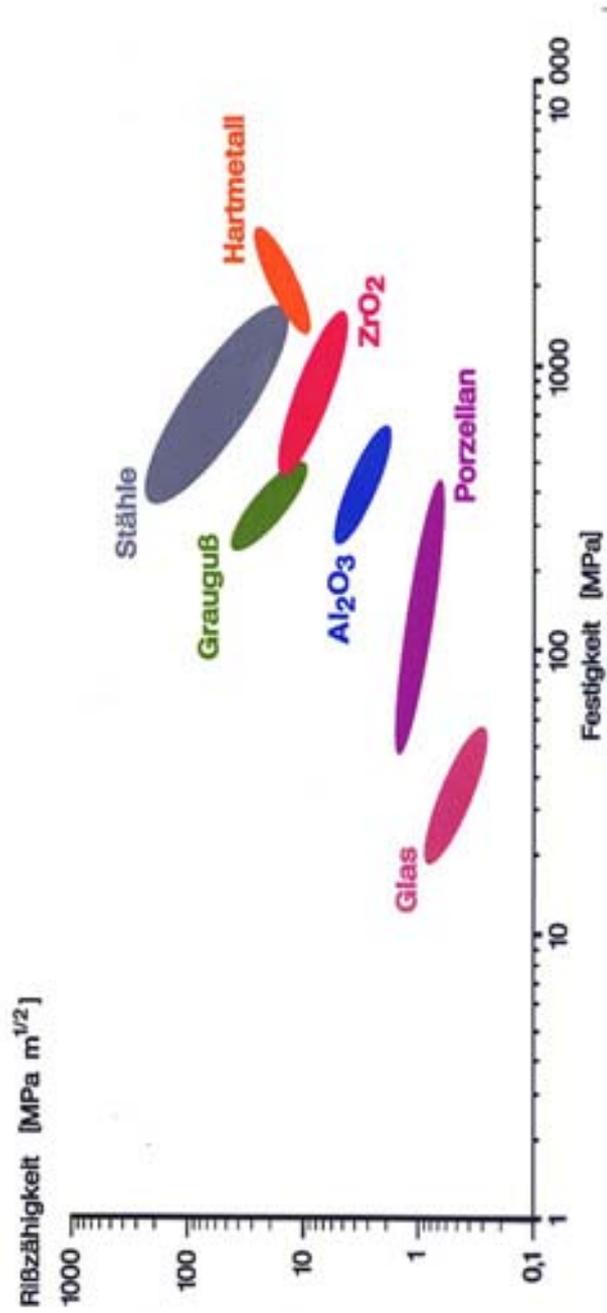


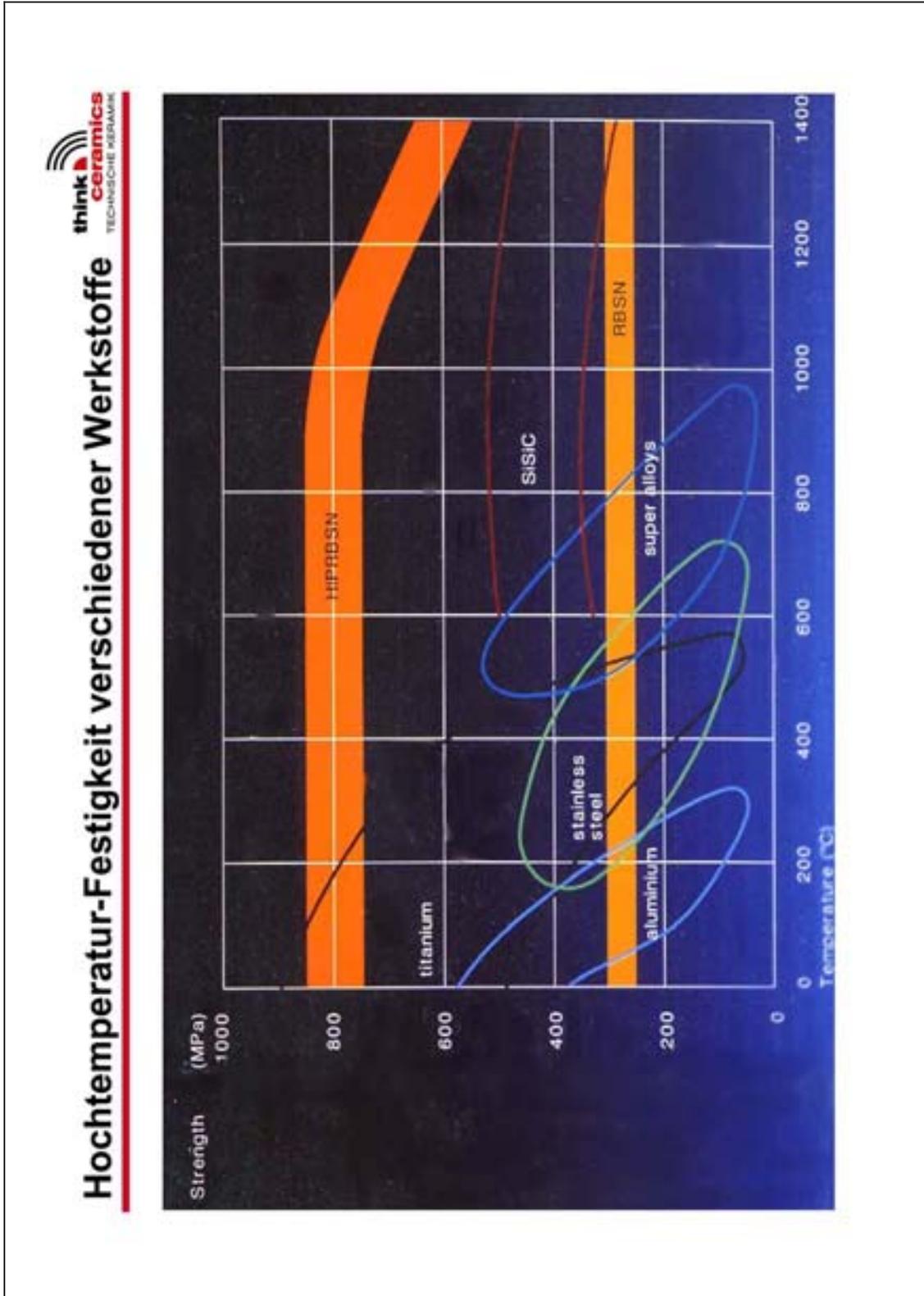
TENSION





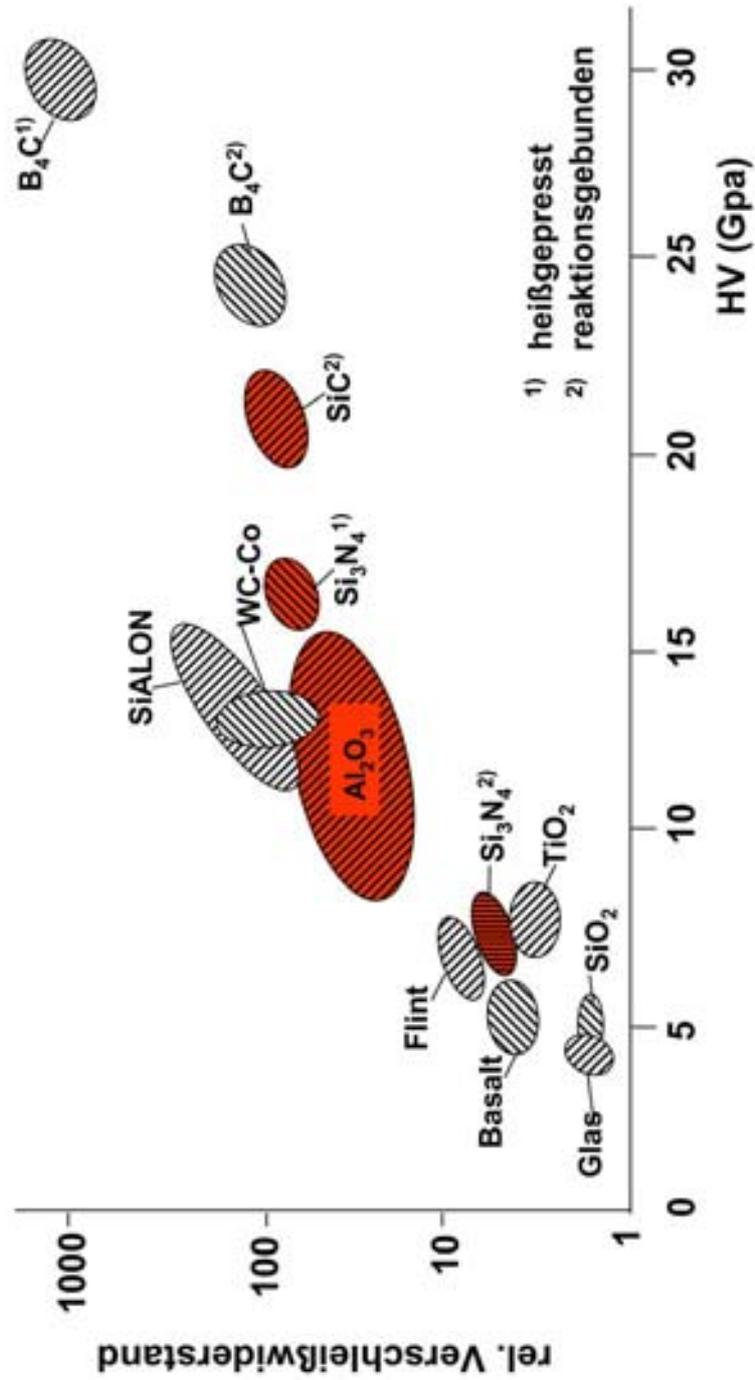
Mechanische Eigenschaften verschiedener Werkstoffklassen



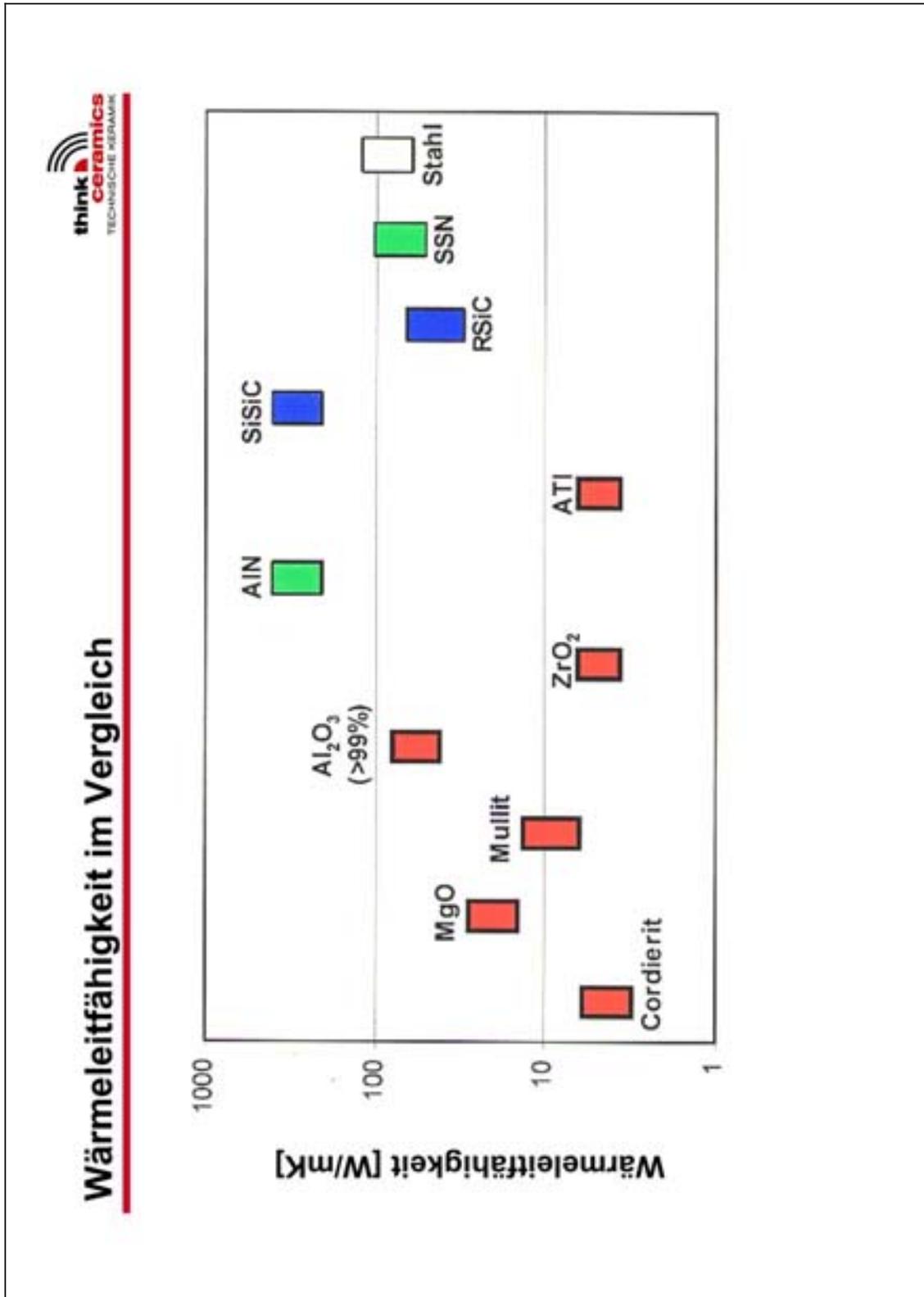


2.1 Werkstoffe - Folie 59

Beständigkeit gegen mechanischen Verschleiß

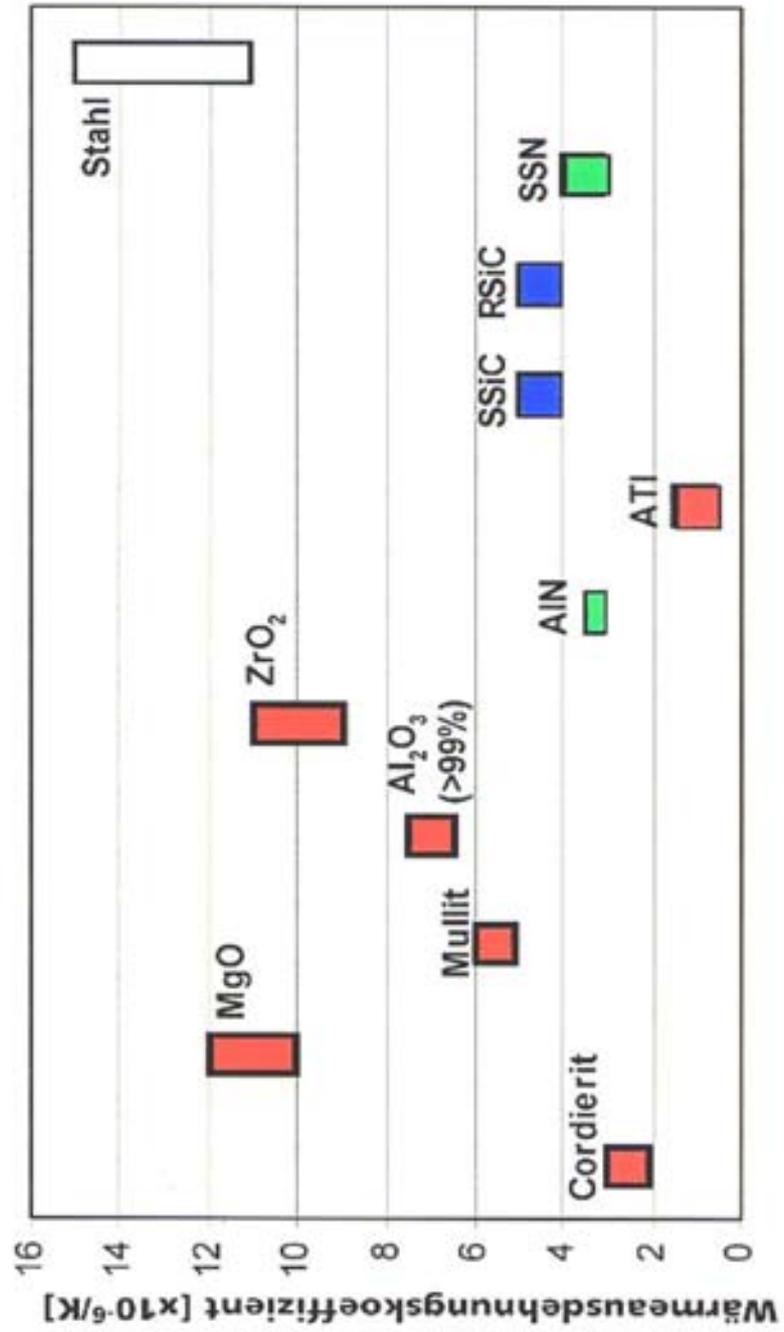


Relativer Verschleißwiderstand von keramischen Werkstoffen



2.1 Werkstoffe - Folie 61

Wärmeausdehnung im Vergleich





Elektrische Leitfähigkeit keramischer Werkstoffe

Isolatoren	Halbleiter	Ionenleiter	Leitfähige Keramiken	Supraleiter
<ul style="list-style-type: none">• Substrate und Isolierbauteile• Dielektrika• Piezoelektrika	<ul style="list-style-type: none">• Varistoren• PTC-Widerstände• NTC-Widerstände• Gassensoren	<ul style="list-style-type: none">• Anionenleiter• Kationenleiter	<ul style="list-style-type: none">• Elektroden• Heizelemente• Dickschichtwiderstände	

Einschränkungen bei Keramik

- ↳ *Vergleichsweise hohe Herstellungskosten*
- ↳ *Spröbruchverhalten (Kantenfestigkeit, Zähigkeit)*
- ↳ *Thermoschockempfindlichkeit*
- ↳ *Konstruktive Einschränkungen bzgl. Bauteilgestaltung*



Positive Eigenschaften

- ↳ **Hochtemperaturbeständigkeit**
- ↳ **Elektrische Isolation (Nichtleitung)**
- ↳ **Verschleissfestigkeit**
- ↳ **Chemische Beständigkeit**
- ↳ **Hohe / niedrige Wärmeleitfähigkeit**
- ↳ **Formbeständigkeit**

Eigenschaften im Vergleich zu Metall

	Keramik	Metall	Kunststoff
Härte	←	→	→
Hochtemperaturfestigkeit	←	→	→
Thermische Ausdehnung	→	←	←
Duktilität	→	←	←
Korrosionsbeständigkeit	←	→	→
Verschleißfestigkeit	←	→	→
elektrische Leitfähigkeit	←	→	←
Dichte	←	→	→
Wärmeleitfähigkeit	←	→	→

← Tendenz zu hohen Werten

→ Tendenz zu niedrigen Werten



6. Ausblick

Wichtige Keramiken und deren Bedeutung

	nach Menge	nach Wert
Silicate		
• Porzellan	ca. 40 %	ca. 15 %
• Steatit	ca. 20 %	ca. 10 %
Oxide		
• Aluminiumoxid	ca. 20 %	ca. 40 %
Nichtoxide		
• Siliciumcarbide	ca. 5 %	ca. 15 %
Nicht aufgeführte	ca. 15 %	ca. 20 %



Vergleich Preisniveau

Silikatkeramik	0,7 – 0,9
Aluminiumoxid	1
Zirkonoxid	5 - 20
Siliciumcarbid	1 - 3
Siliciumnitrid	10 - 20

Entwicklungstendenzen

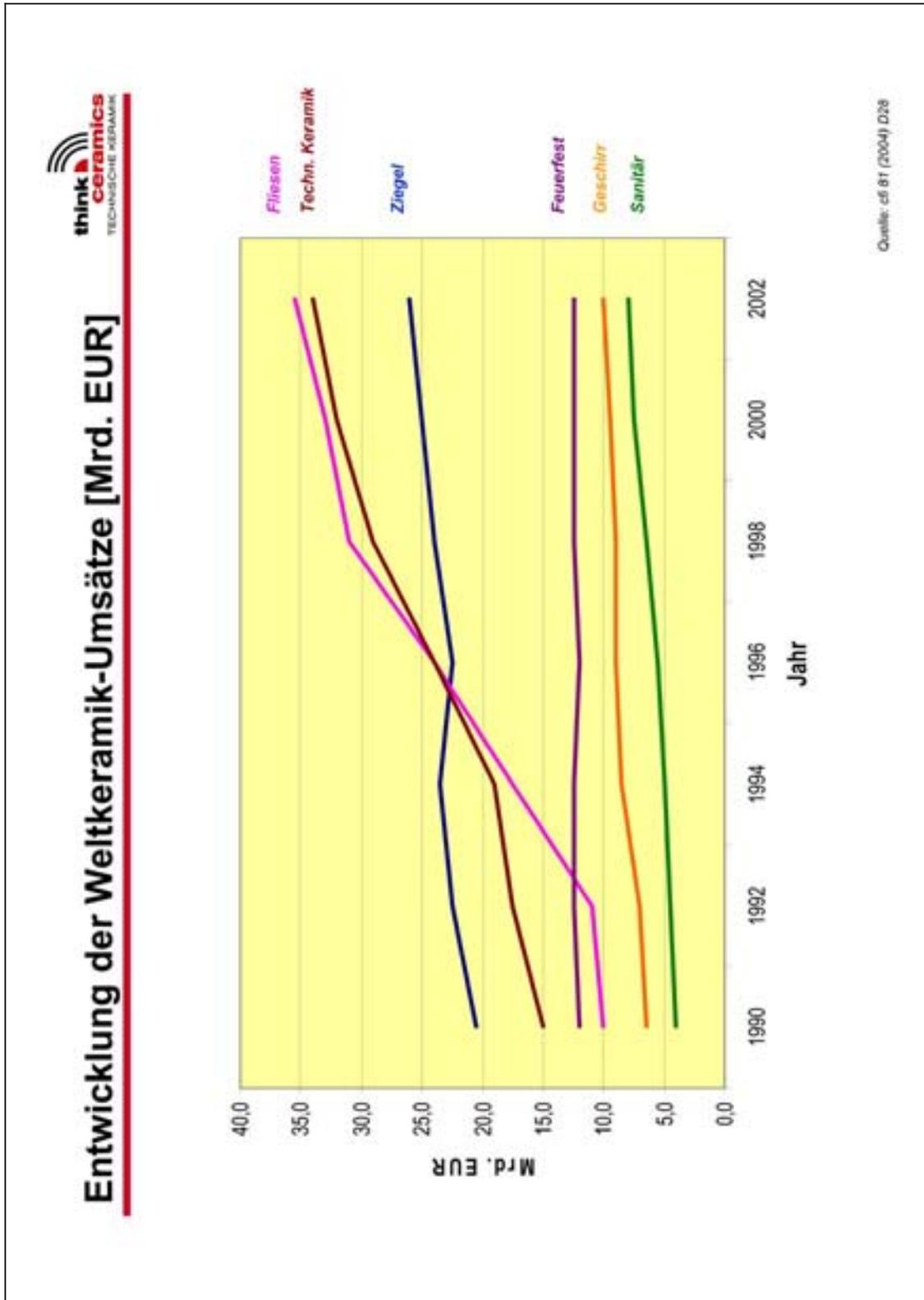
werkstoffbezogen

- Erhöhung der Bruchzähigkeit
- Erhöhung der Schadenstoleranz
- Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit
- Piezoelektrische Keramiken
- Elektrooptische Keramiken
- Hochtemperatursupraleiter
- Ionenleitende Keramiken

verarbeitungsbezogen

- Forcierung der Fertigung unter Raumbedingungen
- Weiterentwicklung der chemischen Herstellungsverfahren, wie z. B.:
 - Sol-Gel-Verfahren
 - Gasphasensynthese
- Endkonturnahe Fertigungsverfahren (near-net-shape-Technologien)
- Optimierung bestehender Herstell- und Fertigungsverfahren im Hinblick auf
 - Qualitätssteigerung
 - Zuverlässigkeitserhöhung
 - Kostenreduzierung
- Beschichtungstechnologien
- Verbindungstechnologien

Einführung



2.1 Werkstoffe - Folie 71

2.2 Elektrotechnik: Werkstoffe und Anwendungen

*Dieser Vortrag muss wegen Ausfall des Referenten
als Einzelvortrag leider entfallen.*

*Die Inhalte sind nun im vorherigen Vortrag von Dr. Peter Stingl
enthalten.*