

Foliensatz **Technische Keramik** für Hochschulen



Hintergrundinformationen und Ablaufvorschlag

Impressum:

Herausgeber: Informationszentrum Technische Keramik (IZTK)
in Zusammenarbeit mit den
Mitgliedsfirmen der Fachgruppe Technische Keramik im
Verband der Keramischen Industrie e.V.

Geschäftsstelle: Verband der Keramischen Industrie e.V.
Informationszentrum Technische Keramik
Schillerstrasse 17; 95100 Selb
Telefon: +49 (0) 92 87 - 9 12 34
Telefax: +49 (0) 92 87 - 7 04 92
E-Mail: info@keramverband.de
<http://www.keramverband.de>

Druck: Fahner Druck GmbH, Lauf
Dezember 2001

Copyright by: © Verband der Keramischen Industrie e.V.
Alle Rechte vorbehalten

Die Vervielfältigung für Lehrzwecke an Hochschulen ist erwünscht.

Vorwort

Die hier vorliegende Dokumentation enthält die Ausarbeitungen von Referenten unserer Seminarreihe „Technische Keramik in der Praxis“ aus den Jahren 1998 bis 2001 sowie die bei den Vorträgen verwendeten Bilder und Diagramme.

Es wurde vor allem darauf geachtet, dass die Textbeiträge in sich verständlich sind.

Die Unterlagen wurden mit aller Sorgfalt zusammengestellt, wobei die einzelnen Autoren für die Inhalte ihrer Beiträge die Verantwortung tragen. An einzelnen Stellen wurden Vorträge zusammengefasst oder aktualisiert, damit wir den Anforderungen einer Hochschulvorlesung gerecht werden.

Die Abbildungen kommen aus dem Bestand des Informationszentrums und stammen von verschiedenen Mitgliedsfirmen.

Sollten aus Ihrer Sicht weitere Themen aufbereitet werden oder Folien durch den Gebrauch defekt sein, so lassen Sie uns dies wissen. Wir werden versuchen im Rahmen unserer Möglichkeiten Abhilfe zu schaffen.

Erweiterte Versionen werden wir den Nutzern der Foliensätze zur Verfügung stellen, soweit Sie uns namentlich bekannt sind.

Bei dieser Version handelt es sich um den ersten Entwurf.

Für Anregungen für den weitere Ausbau des Foliensatzes wären wir dankbar.

Verband der Keramischen Industrie e.V.
- Informationszentrum Technische Keramik -

Martin Hartmann
Selb, den 07. Januar 2002

Inhaltsverzeichnis

- | | |
|--|---|
| 1. Allgemeine Einführung in die Technische Keramik | 7 |
| Dr. Peter. Stingl; CeramTec AG | |

Allgemeine Einführung in die Technische Keramik

Ein Überblick

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

1. Einleitung

Wissenschaft und Technik stehen in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozeß. Dabei führt der Weg zu immer anspruchsvolleren, intelligenteren Technologien.

Mit derselben Dynamik steigen auch die Anforderungen, welche an die zu verwendenden Werkstoffe gestellt werden. Gefordert werden Energie- und Materialeinsparungen, gleichzeitig werden Verbesserungen bei Funktion, Qualität, Lebensdauer und Sicherheit erwartet. Darüber hinaus sollen die Werkstoffe wiederverwertbar oder wenigstens umweltverträglich sein. Schließlich spielt der Preis bzw. das Preis-Leistungs-Verhältnis eine ganz entscheidende Rolle.

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 Jahrzehnte 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 sogenannten Hochleistungskeramik.

Hochleistungskeramik ist in DIN V ENV 12212 definiert als „hochentwickelter, 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 keramische 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 oder auch nicht.

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

2. Was ist Keramik ? Definitionen; Einordnung

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 in das breite Spektrum der organischen und anorganischen Werkstoffe.

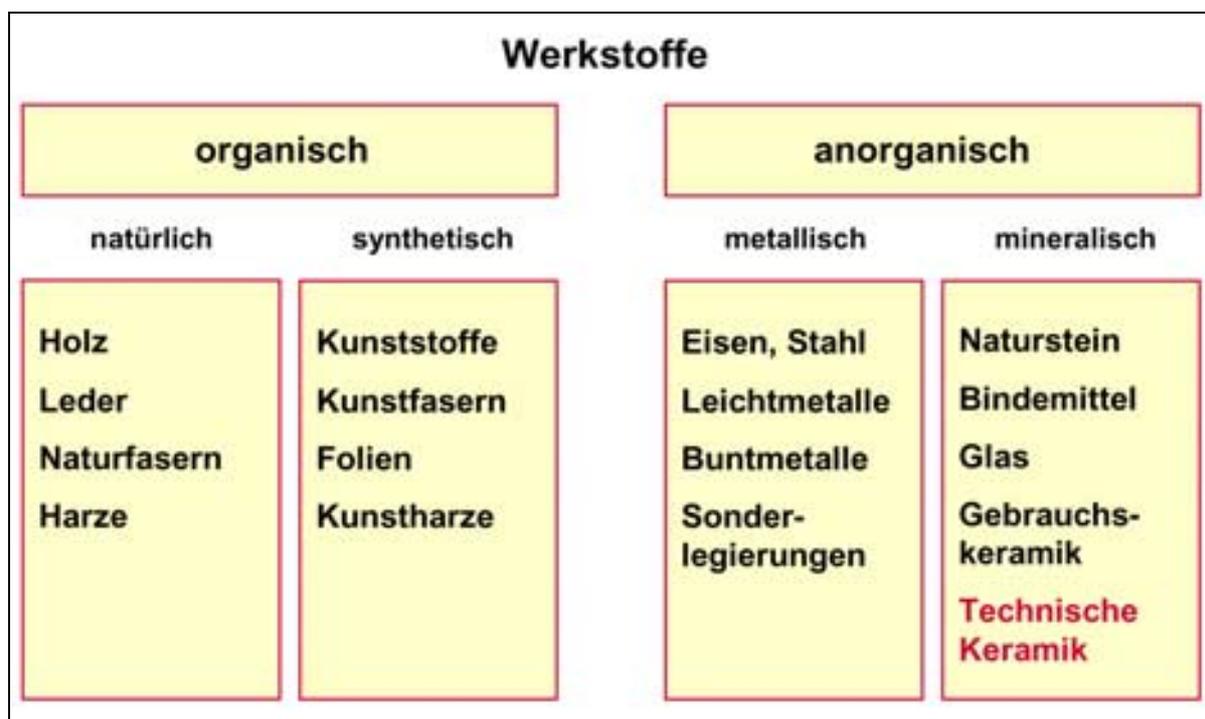


Bild 1: Einordnung in das Spektrum der Werkstoffe

Zu den **keramischen Hochleistungswerkstoffen** zählen kompakte, **nichtmetallische anorganische Werkstoffe**, die im wesentlichen aus anorganischen, meist synthetischen Pulvern, mit eng definierter chemischer Zusammensetzung und Teilchencharakteristik, gewonnen werden.

Die Klassifikation der Keramik hat sich systematisch entwickelt. Mit den gebräuchlichen Einteilungskategorien wie Grob- und Feinkeramik oder dichter bzw. poröser Scherben kann das heutige bestehende Angebot von keramischen Werkstoffen 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 keramische Werkstoffe und Produkte für technische Anwendungen.

In der Literatur auftretende Begriffe (siehe Bild 3 und 4) beschreiben spezielle Aspekte der Technischen Keramik. Eine Einteilung nach diesen Begriffen ist nicht sinnvoll, da sich die Begriffe z.T. stark überschneiden.

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

Struktur- oder Konstruktionskeramik

sind Werkstoffe, die mechanischen Belastungen standhalten müssen, z.B. Biege- und Druckspannungen. Praktisch identische Bedeutung haben **Industrie-** und **Ingenieurkeramik**.

Funktionskeramik

sind Werkstoffe, deren Eigenschaften für eine aktive Funktion verwendet werden, z.B. Nutzung elektrischer, magnetischer, dielektrischer Kennwerte (Beispiel: Piezokeramik).

Elektrokeramik

sind Werkstoffe, die vor allem wegen ihrer elektrischen Isolierfähigkeit und kombiniert mit mechanischen und thermischen Eigenschaften in der Elektrotechnik und Elektronik eingesetzt werden.

Bild 3: Einordnung nach Anwendungsgebieten (1)

Schneidkeramik

sind Werkstoffe, die aufgrund ihrer hervorragenden Verschleiß- und Hitzebeständigkeit als Werkzeug zur spanenden Bearbeitung geeignet sind.

Biokeramik

sind Werkstoffe für den Einsatz im medizinischen Bereich und beinhalten z.B. Erzeugnisse, die Knochen, Zähne oder Gewebe reparieren und ersetzen.

Hochleistungskeramik

ist definiert als „hochentwickelter, hochleistungsfähiger Werkstoff ...“ und wird vor allem zur Abgrenzung zu traditioneller Keramik auf Tonbasis (Geschirr, Sanitärkeramik, Fliesen etc.) verwendet.

Bild 4: Einordnung nach Anwendungsgebieten (2)

Zu den Werkstoffen der Technischen Keramik gehören die folgenden Gruppen:

Silikatkeramik, Oxidkeramik und Nichtoxidkeramik. Weitere Informationen hierzu finden sich in Kapitel 6 dieses Aufsatzes.

Am Beispiel einer Einteilung nach den Eigenschaften soll die Möglichkeiten der inzwischen sehr breiten Werkstoffpalette kurz aufgezeigt werden.

<u>Funktion</u>	elektrisch + magnetisch	mechanisch	thermisch
<u>Eigenschaft</u>	Isolation und Leitfähigkeit, Magnetismus	Druckfestigkeit, Biegefestigkeit, Verschleiß- festigkeit	Leitfähigkeit, Kapazität
<u>Anwendungs- gebiet</u>	Isolierkörper Magnete	Schneidplatten, Maschinenteile	Ofenbau, Metall- erzeugung

Bild 5: Einteilung nach Anwendungsgebiet (1)

<u>Funktion</u>	chemisch + biologisch	nuklear-technisch
<u>Eigenschaft</u>	Bioverträglichkeit, Adsorptionsfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Katalytische Wirksamkeit	Strahlen-, Korrosions-, Temperaturbeständigkeit
<u>Anwendungs- gebiet</u>	Zahn- und Knochenersatz, Chemischer Apparatebau, Katalysatoren	Brennelement- Moderatorstäbe, Hüllmaterial

Bild 6: Einteilung nach Anwendungsgebiet (2)

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass sich die Mehrzahl der HL-Keramiken in der Wachstumsphase des Produktlebenszyklusses befinden.

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 wurden.

Diverse Marktstudien besagen, dass die keramischen HL-Werkstoffe zu den zukunfts-trächtigen Bereichen innerhalb der Werkstoff- und Verarbeitungstechnologien zählen.

Keramische Hochleistungs-Werkstoffe	Polymere Hochleistungs-Werkstoffe	Metallische Hochleistungs-Werkstoffe	Hochleistungs-verbund-werkstoffe	Halbleiter Werkstoffe
<ul style="list-style-type: none"> • Silikat-keramiken 	<ul style="list-style-type: none"> • Technische Polymere 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausgewählte Eisen- und Eisenmetall-legierungen 		
<ul style="list-style-type: none"> • Oxid-keramiken 	<ul style="list-style-type: none"> • Spezial-polymere 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausgewählte Nichteisen-metalle und Legierungen 		
<ul style="list-style-type: none"> • Nichtoxid-keramiken 				

Bild 7: Zukunftsträchtige Werkstoffbereiche (nach ADL, 1994)

Bauteile aus Hochleistungswerkstoffen weisen attraktive Marktpotentiale auf. 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. Zur Zeit hat die technische Keramik am Gesamtmarkt "Keramik" der westlichen Welt lediglich einen Anteil von ca. 30 % (davon > 2/3 Elektronik). Weltweit sind die Anteile der Hochleistungskeramik im Vergleich zur klassischen Keramik (Geschirr, Feuerfest, Fliesen etc.) noch relativ bescheiden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich aus Segmenten, wo die speziellen Stärken der Keramik konsequent genutzt werden, die Märkte der Zukunft entwickeln. Eher konservative Schätzungen gehen von einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 6 - 8 % aus. Derzeit werden diese Zahlen in Teilbereichen deutlich übertroffen.

4. Die wichtigsten Herstellungsrouten

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 Herstellung keramischer Bauteile den in der Pulvermetallurgie üblichen Routen sehr ähnlich. Die wesentlichen Verfahrensschritte zeigen Bild 8 und 9.

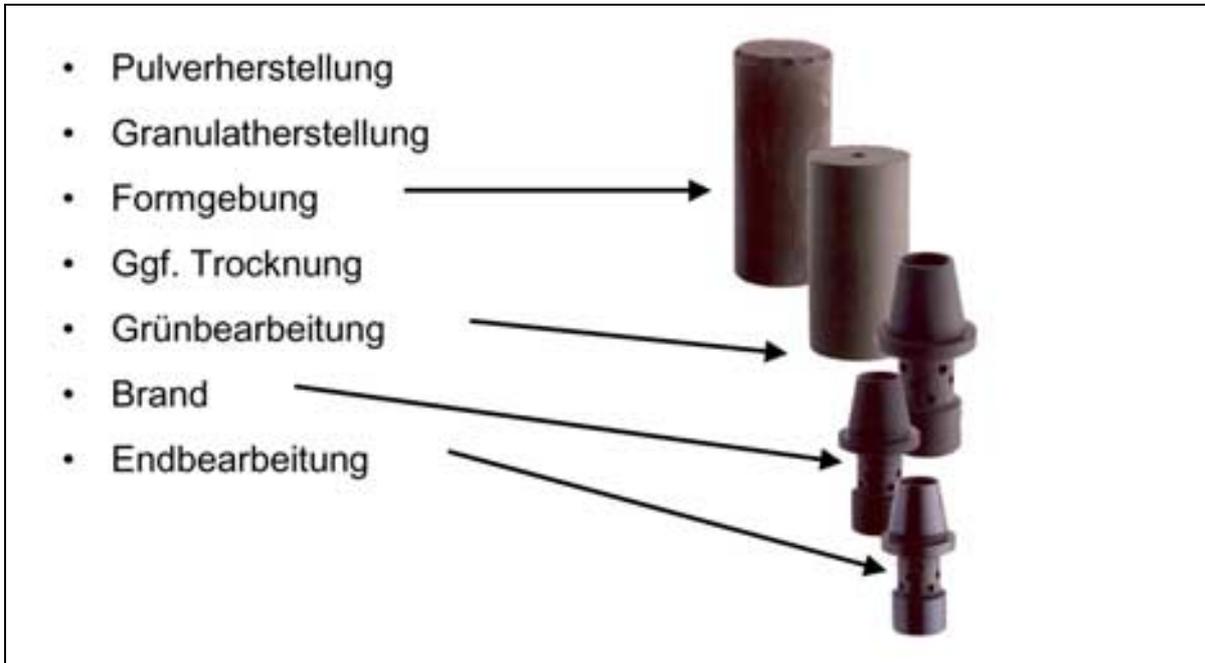


Bild 8: Wesentliche Verfahrensschritte (1)



Bild 9: Wesentliche Verfahrensschritte (2)

4.1 Ausgangspulver, Rohstoffe

Silicatkeramik, wie z.B. Porzellan, wird 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 Konstanz nicht mehr erfüllen. In den letzten Jahren hat sich der Trend hin zu immer feineren (bis zu Nonometerbereich) und reineren Pulver verstärkt.

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



Bild 10: Rohstoffe und Additive

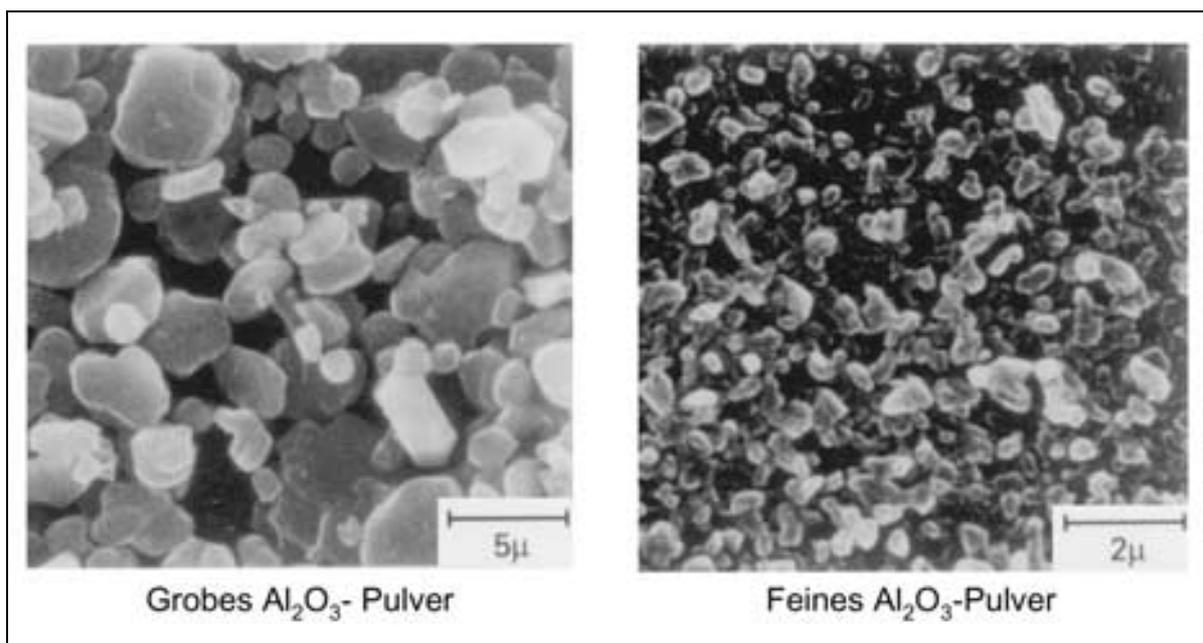


Bild 11: Aluminiumoxidpulver

4.2 Aufbereitung

Die Aufbereitung beinhaltet das (Mahlen 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". Hierbei wird die wässrige Suspension zerstäubt und die entstehenden Tröpfchen werden im heißen Luftstrom getrocknet. Es entsteht dabei ein gut fließfähiges Granulat.

- Mischen
- Mahlen
- Filterpressen
- Sprühtrocknung
- Schlickeraufbereitung



Trommelmühle

Bild 12: Aufbereitung

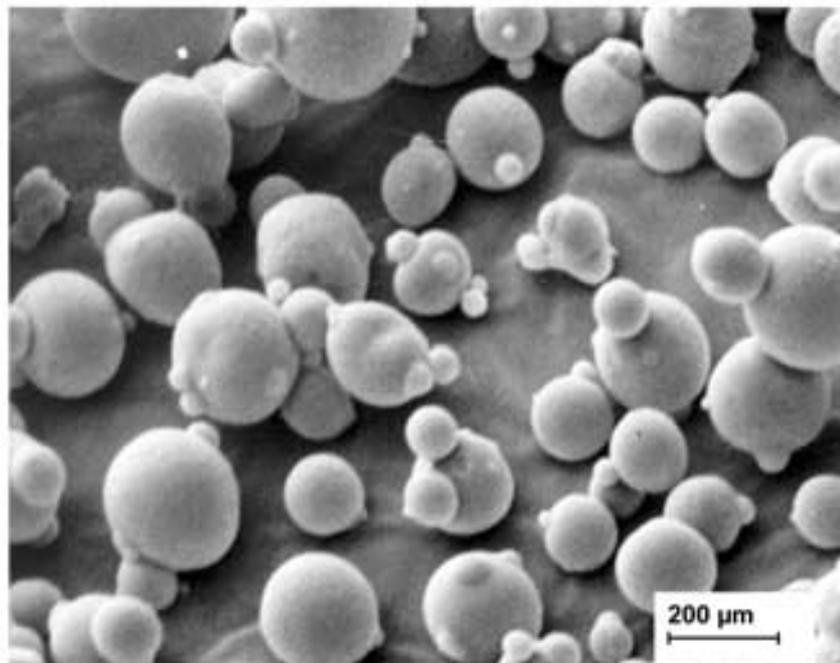


Bild 13: Aluminiumoxid-Sprühgranulat

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 nachgeschalteten Brand (Sintern) um ca. 20 % verkleinern ("Schwindung").

Eine Einteilung der Formgebungsarten kann nach dem Feuchtigkeitsgehalt in der Masse erfolgen.

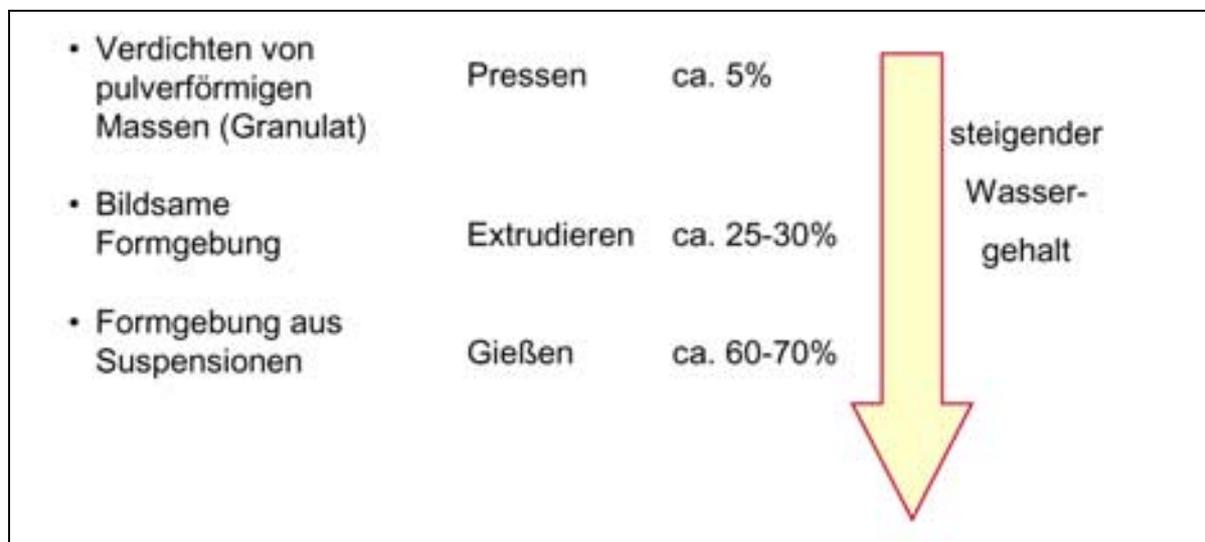


Bild 14: Formgebungsverfahren nach dem Feuchtegehalt

Bild 15 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.

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 • Plasmaspritzen

Bild 15: Ur-Formgebungsverfahren

4.3.1 Formgebung durch Verdichten ("Pressen")

Die größte Bedeutung als großserientaugliches Verfahren hat die Formgebung durch **uniaxiales Pressen** erreicht.

Dabei werden gut rieselfähige Granulate in Stahlmatrizen, die entsprechend dem herzustellenden Teil profiliert sind, verdichtet.

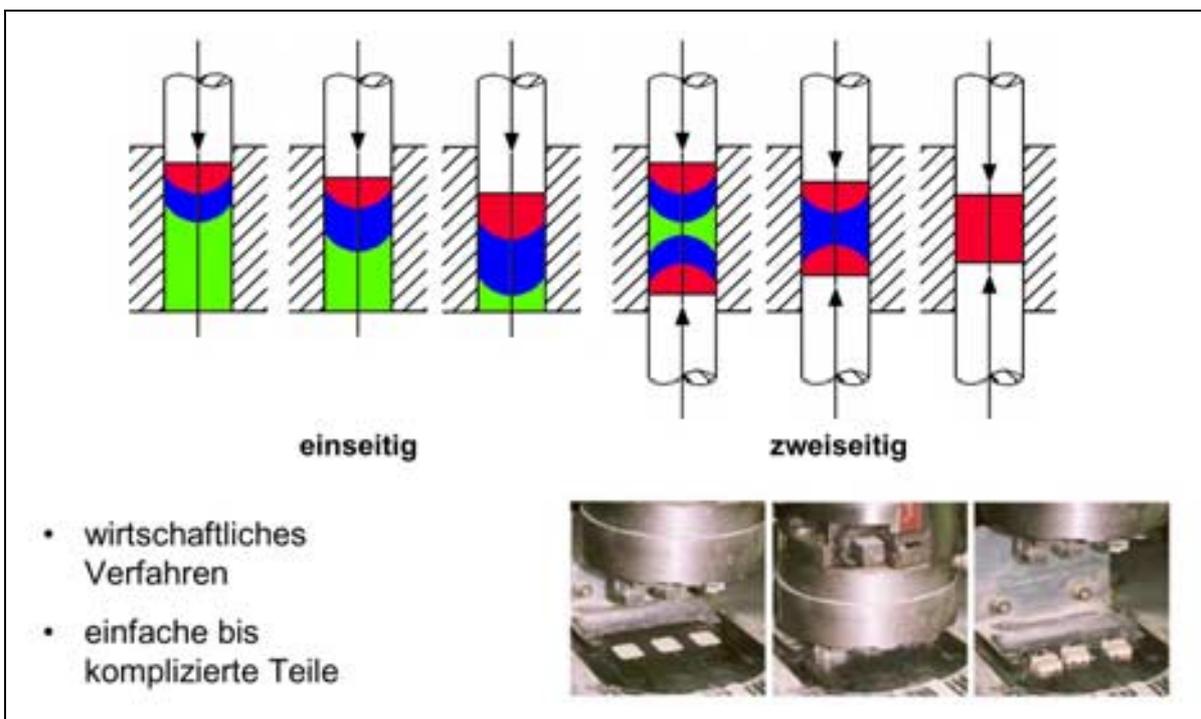


Bild 16: Uniaxiales Pressen

Bild 16 zeigt schematisch die einzelnen Schritte beim sogenannten Trockenpressen (uniaxial). Während des Verdichtungsvorganges wird das Granulat auf ca. 50 - 60 % seines ursprünglichen Volumens verdichtet.

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

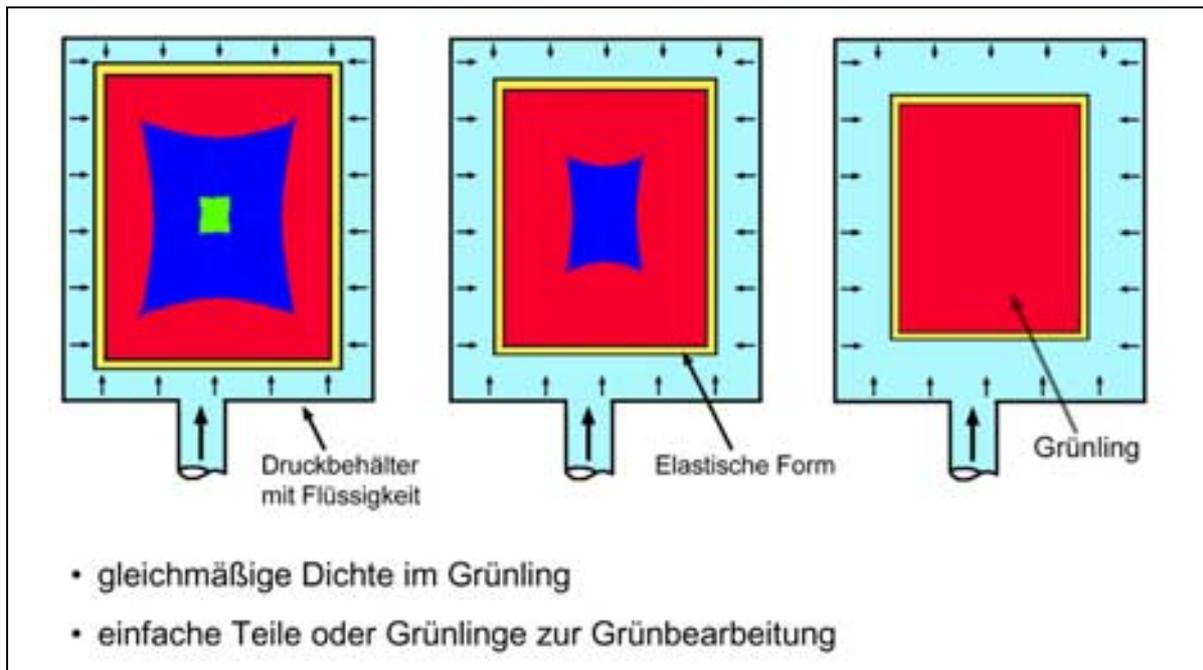


Bild 17: Isostatisches Pressen

4.3.2 Formgebung durch plastisches Verformen

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 dieser Massen geschieht i.a. in sogenannten Schneckenpressen (Bild 18); daneben sind im geringeren Umfang auch noch Kolbenpressen in Gebrauch.

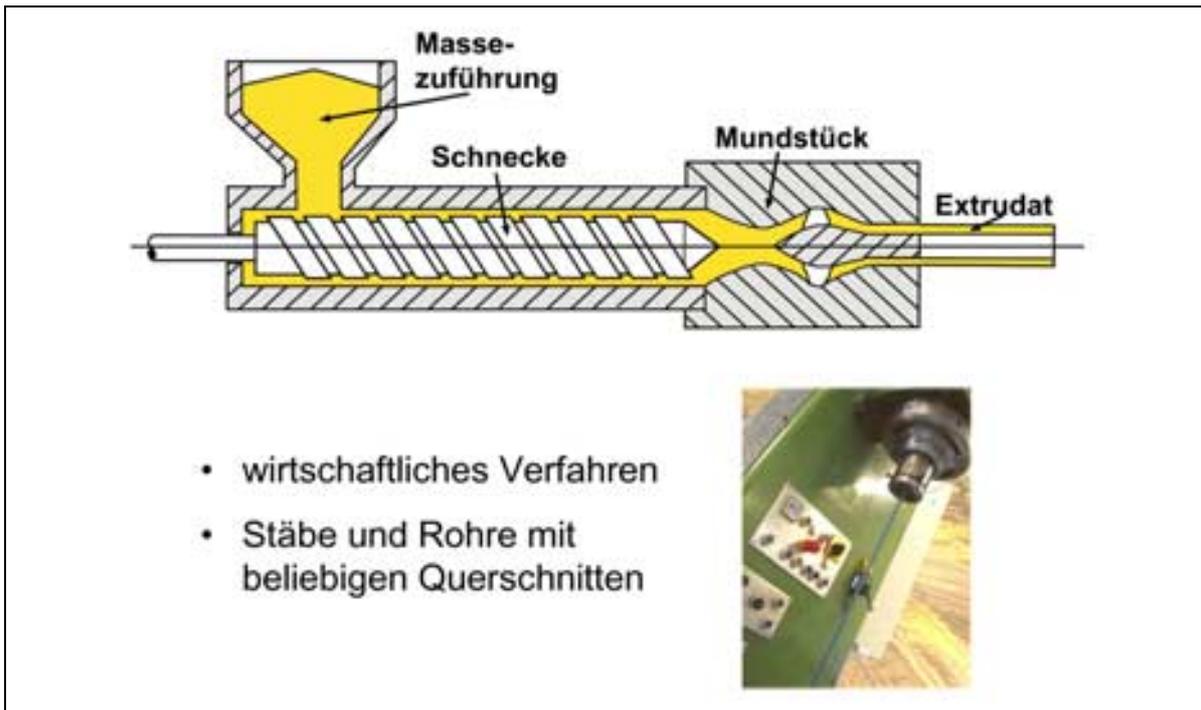


Bild 18: Extrudieren

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) vermisch. Durch Erhitzen wird die Masse durch die Erweichung der Thermoplaste verflüssigt. Die flüssige Masse wird anschließend mit Druck in eine gekühlte Metallform mit der gewünschten Kontur gespritzt, wo die eingepreßte Flüssigkeit zu einem festen Werkstück erstarrt.



Bild 19: Spritzgießen

4.3.3 Formgebung aus Suspensionen

Die Technik des **Schlickergießens** gehört zu den klassischen keramischen Formgebungsverfahren. Beim Schlickergießen wird eine giessbare, im allgemeinen wässrige Suspension (= der Schlicker) in eine poröse, meist mehrteilige Gipsform gegossen. Durch die Kapillarwirkung der Poren entzieht die Gipsform auf ihrer Oberfläche dem Schlicker Wasser und es bildet sich an der Oberfläche der sogenannten Scherben. Beim Hohl-gussverfahren wird die mit Schlicker gefüllte Gipsform solange stehen gelassen, bis die gewünschte Wandstärke erreicht ist. Nach dem Abschwinden von der Form (durch Trocknung) können die Teile entnommen werden.

Große Bedeutung hat mittlerweile das **Foliengießverfahren** in der technischen Keramik erlangt. Bei diesem Verfahren wird der Schlicker auf eine horizontal umlaufendes endloses Band (meist poliertes Stahlblech) gegossen und über einen engen Spalt gleichmäßig auf das Band verteilt.

Durch Variation der Spalthöhe läßt sich die Dicke der Folien (0,2 - 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 oder aufgewickelt werden.

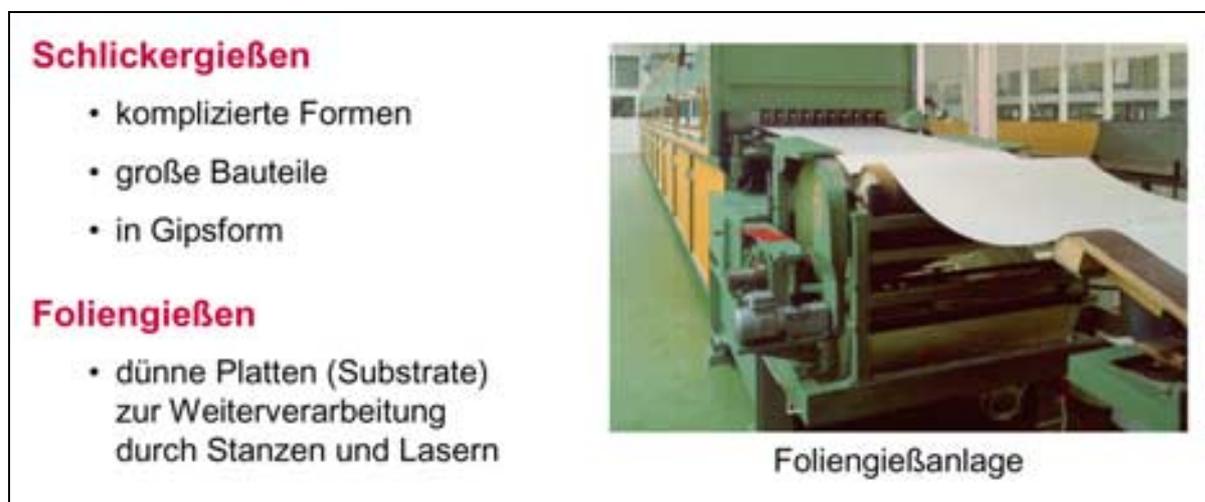


Bild 20: Spritzgießen

4.3.4 Sonstige Formgebungsverfahren

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

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 vor allem für Einzelteilefertigung oder Kleinserien geeignet.



Bild 21: Grünbearbeitung

4.4 Verfestigung durch Temperaturbehandlung - der Sinterbrand

geschieht

- bei Temperaturen von ca. 1.050 bis 2.200°C
- ggf. unter definierter Atmosphäre (Schutzgas, ...)
- ggf. mit Druckunterstützung

ist verbunden mit

- Schrumpfen ca. 20%

Alle Parameter sind werkstoffabhängig!



Bild 22: Sintern

Das Sintern umfasst den sehr komplexen Vorgang der Verdichtung eines pulverförmigen Materials unter Temperatureinwirkung. Da beim Sintern eine Verdichtung eintritt, muss ein Materialtransport stattfinden. Die treibende Kraft für diesen Vorgang ist das Bestreben jedes Pulverkörpers, die Oberflächenenergie zu vermindern (siehe Bild 23). Der Verdichtungsprozess ist mit einem Schrumpfungsprozess (Größenordnung ca. 20 %, siehe Bild 25) 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 Sintervorgang kann durch eine geeignete 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).

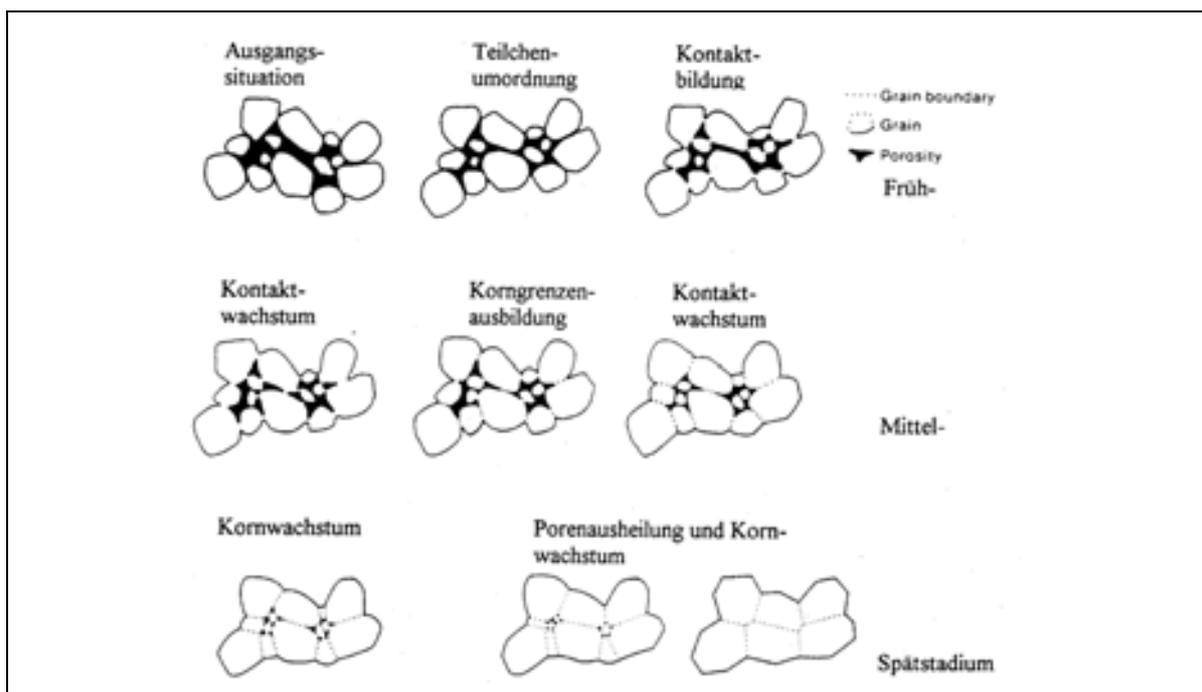


Bild 23: Sintervorgang

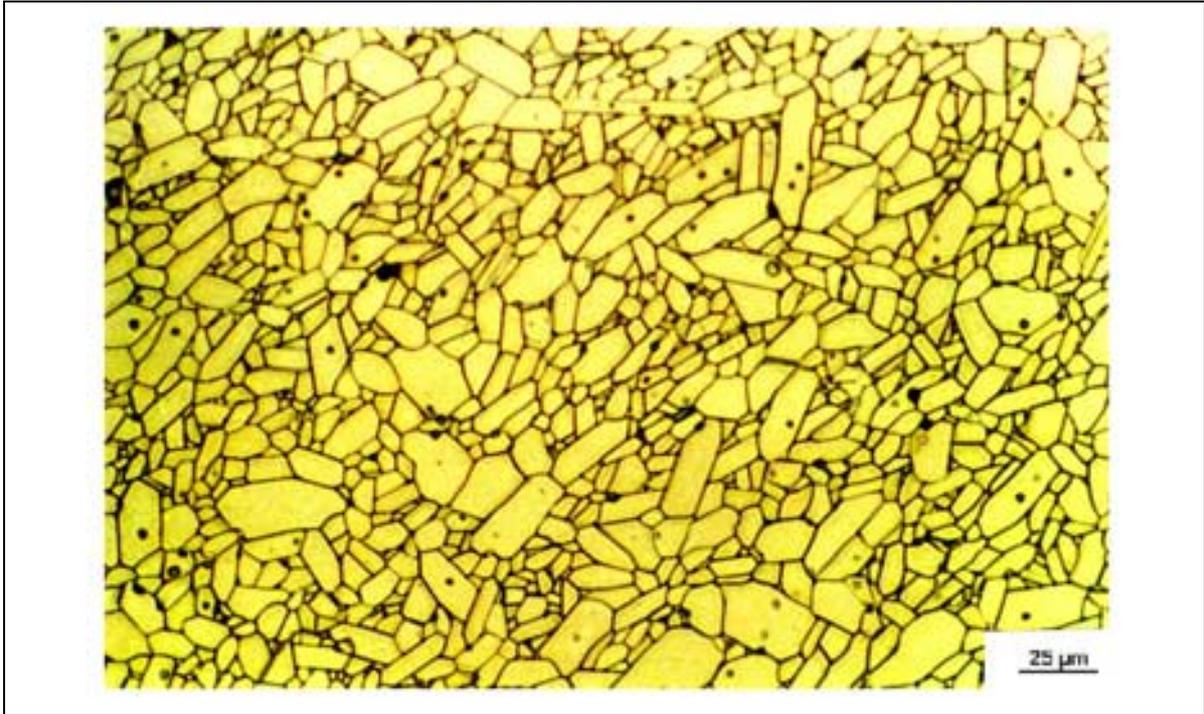


Bild 24: Gefüge von Aluminiumoxid

Werkstoff	Schwindung S
SISIC/RSIC	ca. 0 %
SSIC	18 - 20 %
poröser Cordierit	ca. 3 %
Tonerdeporzellan	ca. 13 - 16%
Al ₂ O ₃	ca. 18%
ZrO ₂	ca. 25%

Bild 25: Schwindung unterschiedlicher Werkstoffe

4.5 End- / Hartbearbeitung

Bedingt durch die Verfahrensschritte "Formgebung" und "Brennen" befinden sich keramische Bauteile in einem Zustand, der bei erhöhten Anforderungen an Maßgenauigkeit und Oberflächengüte, z.B. wegen Dicht- und Gleitaufgaben von Funktionsflächen weitere Bearbeitungsschritte für letztere notwendig macht.

Die spanende Nachbearbeitung hochfester keramischer Bauteile ist aufgrund der Härte- und Verschleißfestigkeit sowie der notwendigen teuren 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 sind auch bei keramischen Werkstoffen die erreichbaren Toleranzen und Oberflächengüten sehr stark vom angewendeten Fertigungsverfahren abhängig.

wird notwendig bei

- erhöhten Anforderungen an die Maßgenauigkeit
- erhöhten Anforderungen an die Oberflächen

ist verbunden mit

- hohen Werkzeugkosten
- langen Bearbeitungszeiten

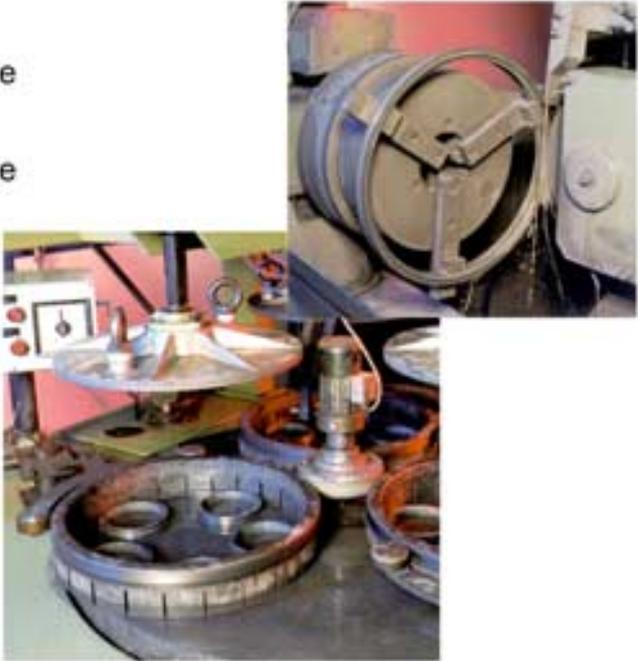


Bild 26: End- / Hartbearbeitung

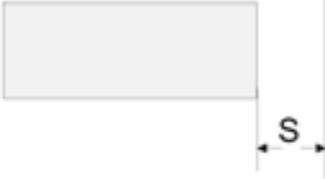
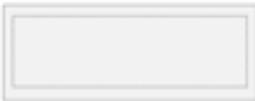
Fertigungsschritte	Bauteil	Standard-toleranzen	Toleranzen mit Präzisionsverfahren
Formgebung / Grünbearbeitung			
Sintern		$\pm 2\%$	$\pm 1\%$
Endbearbeitung		$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 0,1 \mu\text{m}$

Bild 27: Toleranzen und Schwindung

4.6 Verbindungstechnik

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

Die Verbindung kann sein

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

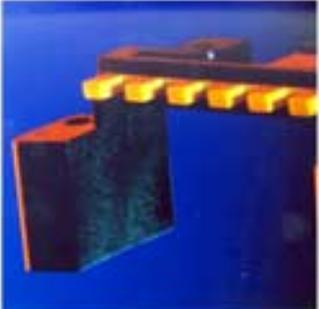




Bild 28: Verbindungstechnik -Arten

Alle in Bild 28 genannten Verbindungstechniken werden heute bereits angewandt, wobei die Verfahren Löten, Schrumpfen und Eingießen die größte technische Bedeutung erlangt haben.

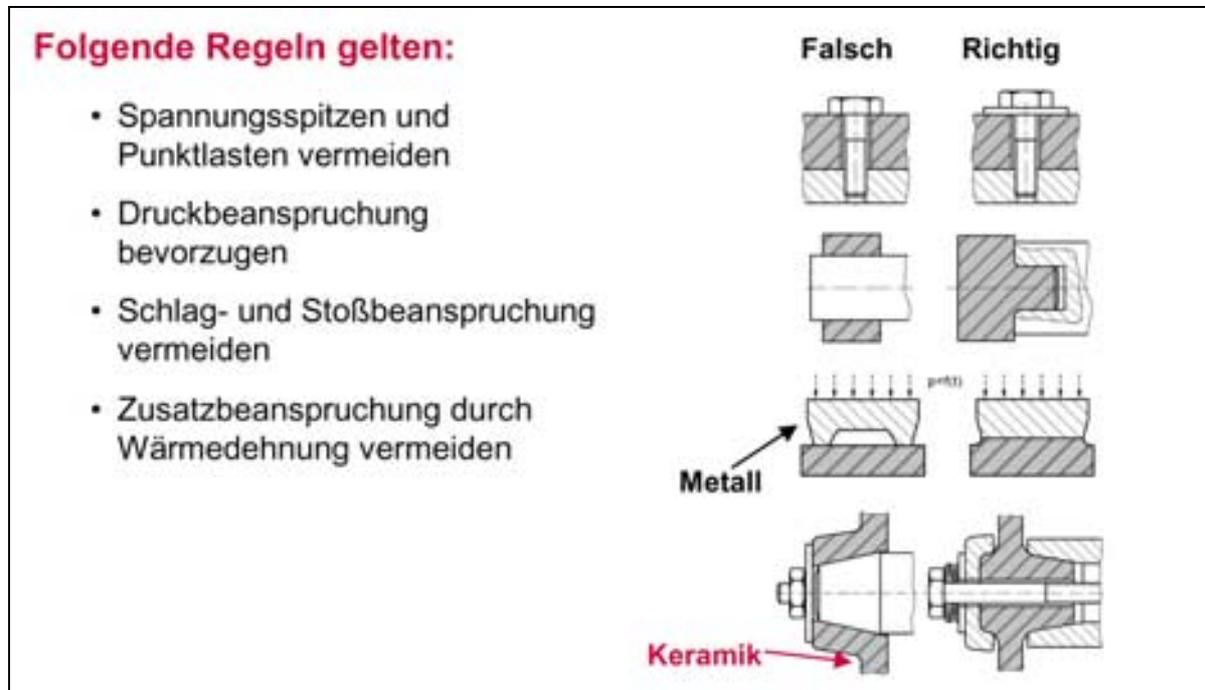


Bild 29: Verbindungstechnik - Regeln

5. Eigenschaften

Gegenüber den Metallen bieten Hochleistungskeramiken eine Reihe von Vorzügen:

- Härte
- Verschleißfestigkeit
- Korrosionsbeständigkeit
- Formstabilität
- Warmfestigkeit
- elektrisches Isolationsvermögen
- geringes spezifisches Gewicht

dem stehen als Nachteil gegenüber

- Sprödigkeit

Aussagekräftiger ist jedoch ein Vergleich der Tendenzen der physikalischen Größen entsprechend Bild 30.

	Keramik	Metall
Härte	↑	↓
Hochtemperaturfestigkeit	↑	↓
Thermische Ausdehnung	↓	↑
Duktilität	↓	↑
Korrosionsbeständigkeit	↑	↓
Verschleißfestigkeit	↑	↓
elektrische Leitfähigkeit	↓	↑
Dichte	↓	↑
Wärmeleitfähigkeit	↓	↑

↑ Tendenz zu hohen Werten
 ↓ Tendenz zu niedrigen Werten

Bild 30: Allgemeiner Vergleich zu Metall

Bedingt durch die Vielzahl an teilweise extrem unterschiedlichen Eigenschaften ergeben sich sehr differenzierte Anwendungsgebiete, wo die Vorteile der Keramik gezielt zum Einsatz kommen.

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

Silicatkeramik	Oxidkeramik	Nichtoxidkeramik
• Porzellan	• Aluminiumoxid	• Siliciumcarbid
• Steatit	• Magnesiumoxid	• Siliciumnitrid
• Cordierit	• Zirkonoxid	• Aluminiumnitrid
• Mullit	• Aluminiumtitanat	• Borcarbid
	• Bleizirkonat-titanat (Piezokeramik)	• Bornitrid

Bild 31: Keramische Werkstoffe in der Technik

Somit ist es durch die genaue Kenntnis der Werkstoffanforderungen 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!

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:

	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 %

Bild 32: Wichtige Keramiken und deren Marktbedeutung

Im Vergleich zu Aluminiumoxid hat sich Zirkonoxid, bedingt durch den höheren Preis, erst in wenigen Gebieten etablieren können. Dies sind ausschließlich Bereiche, wo ZrO_2 deutliche Vorteile gegenüber Al_2O_3 gezeigt hat.

Daneben haben die genannten unterschiedlichen Marktanteile aber auch historische Gründe: Aluminiumoxid wird als Werkstoff bereits seit ca. 60 - 70 Jahren verwendet, während 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 Si₃N₄ noch relativ bescheiden. Aufgrund ihrer z.T. ungewöhnlichen Eigenschaftskombination hat der Marktanteil der Nichtoxide in den letzten Jahren jedoch kontinuierlich zugenommen.

6.1 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, der auch Hochfrequenzsteatit genannt wird.

Sondersteatit besitzt beste mechanische und dielektrische Eigenschaften und findet seit mehr als 60 Jahren vielfach 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 für das Trockenpressverfahren.

Wichtiger silicatischer Werkstoff mit

- gute Festigkeit auch bei höheren Temperaturen
- Temperaturwechselbeständigkeit
- gute dielektrische Eigenschaften
- niedriger Verlustfaktor
- gut zu verarbeiten



Sockel und Fassungen



Lampenfassung, vernietet

Bild 33: Steatit

6.2 Aluminiumoxid (Al₂O₃)

Aluminiumoxid ist unter den modernen Keramiken der oxidkeramische Werkstoff, der die weiteste Anwendung gefunden hat. Es gibt verschiedene Werkstoffgruppen, die sich im wesentlichen im Al₂O₃-Gehalt unterscheiden.

Je niedriger der Anteil an Al₂O₃, um so höher sind die Mengen an SiO₂, CaO und MgO in Form von Silikaten und Spinellen. Für die zuvor genannten verschiedenen Werkstofftypen werden Pulver mit unterschiedlichem Verunreinigungsgrad, z.B. an SiO₂, Fe₂O₃ und Na₂O 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 Al₂O₃-Gehalt oder Magnesiumverbindungen bei hohen Al₂O₃-Gehalten und entsprechender Formgebung, werden die Pulvergemische bei 1.500 - 1.700 °C gesintert. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung ergeben sich typische Änderungen in den Eigenschaften. So steigen z.B. mit zunehmender Reinheit der Werkstoffe Biegefestigkeit, E-Modul und Wärmeleitfähigkeit an.

Technisch wichtigster oxidkeramischer Werkstoff mit

- hoher Festigkeit
- hoher Härte
- Temperaturstabilität
- hoher Verschleißfestigkeit
- hoher Korrosionsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen



Rohrbogen zum Aschetransport

Tyristorgehäuse

Dichtscheiben, Fadenführer, Düsen

Bild 34: Aluminiumoxid (Al₂O₃)

6.2 Zirkonoxid (ZrO₂)

Zirkonoxid kommt in drei Modifikationen vor, wobei bis oberhalb 1.000 °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 °C ist das kubische ZrO₂ stabil. Der für den technischen Einsatz von ZrO₂ sehr störende Volumensprung bei der Umwandlung monoklin ↔ tetragonal kann durch eine vollständige Stabilisierung verhindert werden; als stabilisierende Additive haben sich MgO, CaO, Y₂O₃ und CeO₂ bewährt. Von großer technischer Bedeutung ist die Teilstabilisierung. Hierbei sind bei Raumtemperatur im kubischen ZrO₂-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 sogenannten umwandlungsverstärktem ZrO₂ findet die Phasenumwandlung monoklin ↔ 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 ZrO₂ (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 außerordentlich hohe mechanische Festigkeit bis über 1.500 MPa aus.

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 ZrO₂

Drahtumlenkrollen aus ZrO₂

Bild 35: Zirkonoxid (ZrO₂)

FSZ:

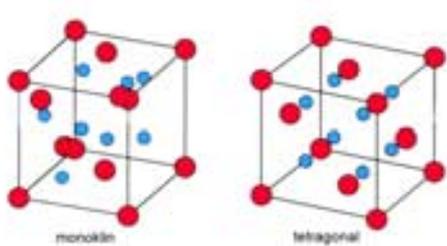
- **Vollstabilisiertes Zirkonoxid** mit kubischem Kristallgitter

PSZ:

- **Teilstabilisiertes Zirkonoxid** mit Kristallen kubischer und tetragonaler Phase

TZP:

- **Tetragonalstabilisiertes Zirkonoxid** mit tetragonalem Kristallgitter



Die monokline Phase entsteht unter Belastung, sind mit einer Volumenzunahme verbunden und stoppen die Rissbildung. Hieraus resultiert die „Pseudoelastizität“ von PSZ und TZP.

Bild 36: Zirkonoxid (ZrO_2) - Werkstoffvarianten

6.3 Aluminiumtitanat (Al_2TiO_5)

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.

Die wichtigsten Eigenschaften sind das hohe elektrische Isolationsvermögen, die gute chemische Beständigkeit und die hohe Verschleißfestigkeit.

Besondere Eigenschaften:

- niedrige Wärmeleitfähigkeit
- sehr niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und damit verbundener sehr hoher Temperaturwechselbeständigkeit
- geringer Benetzbarkeit durch Aluminium- und Buntmetallschmelzen
- offene Porosität



Hilfsmittel für den NE-Metallguß

Bild 37: Aluminiumtitanat (Al_2TiO_5)

6.4 Sonstige Oxide

Berylliumoxid wird trotz einiger herausragender Eigenschaften, besonders der hohe Wärmeleitfähigkeit, infolge der Toxizität von Be-Verbindungen nicht mehr verwendet.

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

6.5 Siliciumcarbid (SiC)

Siliciumcarbid ist schon lange Zeit als Brennhilfsmittel in der Feuerfest-Industrie und als Heizleiter in der Elektroindustrie bekannt. Seit einiger Zeit wird Siliciumcarbid auch als Konstruktionswerkstoff insbesondere für den Maschinenbau, aber auch für Anwendungen in der Energietechnik eingesetzt. Dabei stehen seine hohe Härte, die gute Wärmeleitfähigkeit und eine relativ gute Hochtemperaturfestigkeit im Vordergrund des Interesses. 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.

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 der Werkstoff praktisch nicht schwindet, lassen sich große und/oder komplizierte Bauteile realisieren.

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.

Werkstoffvarianten mit folgenden gemeinsamen Eigenschaften:

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



Segmentierte SiC-Düse mit Halterung

Bild 38: Siliciumcarbid (SiC)



Rekuperator-Brenner aus SiC

Bild 39: Siliciumcarbid (SiC) - Beispiel

6.6 Siliciumnitrid (SN)

Siliciumnitrid ist in den letzten Jahren besonders wegen seiner ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen ein interessanter Konstruktionswerkstoff 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.

Werkstoffvarianten mit folgenden Eigenschaften:

- extrem hohe Festigkeit
- hohe Zähigkeit
- hervorragende Verschleißfestigkeit
- niedrige Wärmeausdehnung
- mittlere Wärmeleitfähigkeit
- ausgezeichnete Temperaturwechselbeständigkeit
- sehr gute chemische Beständigkeit



Kugellagerkugeln aus SN

Bild 40: Siliciumnitrid (SN)

6.7 Aluminiumnitrid (AlN)

Aluminiumnitrid hat in letzter Zeit zunehmend an Bedeutung gewonnen, insbesondere im Bereich der Hochleistungselektronik. AlN zeichnet sich durch eine extrem hohe Wärmeleitfähigkeit (180 W/mK) sowie durch seine hervorragende elektrische Isolationseigenschaften aus. Die mechanischen Eigenschaften sind mit demjenigen von Aluminiumoxid vergleichbar. Die Herstellung von dichten AlN-Werkstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit erfordert hohe Aufwendungen bei der Pulverherstellung und im keramischen Processing, so daß die Anwendungen aufgrund des relativ hohen Preisniveaus bisher auf Spezialfälle im High-end-Bereich beschränkt sind.

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

Werkstoffvarianten mit folgenden Eigenschaften:

- sehr hohe Wärmeleitfähigkeit
- hohes elektrisches Isolationsvermögen
- thermische Ausdehnung ähnlich Si ($< \text{Al}_2\text{O}_3$)
- inertes Verhalten gegen Schmelzen der III-V-Verbindungen



Bauteile aus AlN

Bild 41: Aluminiumnitrid (AlN)

7. Zusammenfassung, Ausblick

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

Bild 42 zeigt am Beispiel der Festigkeit von Si_3N_4 , wie alleine durch geeignete verfahrenstechnische Optimierungen Festigkeit und Zuverlässigkeit (ausgedrückt durch den Weibull-Modul) deutlich verbessert werden konnte.

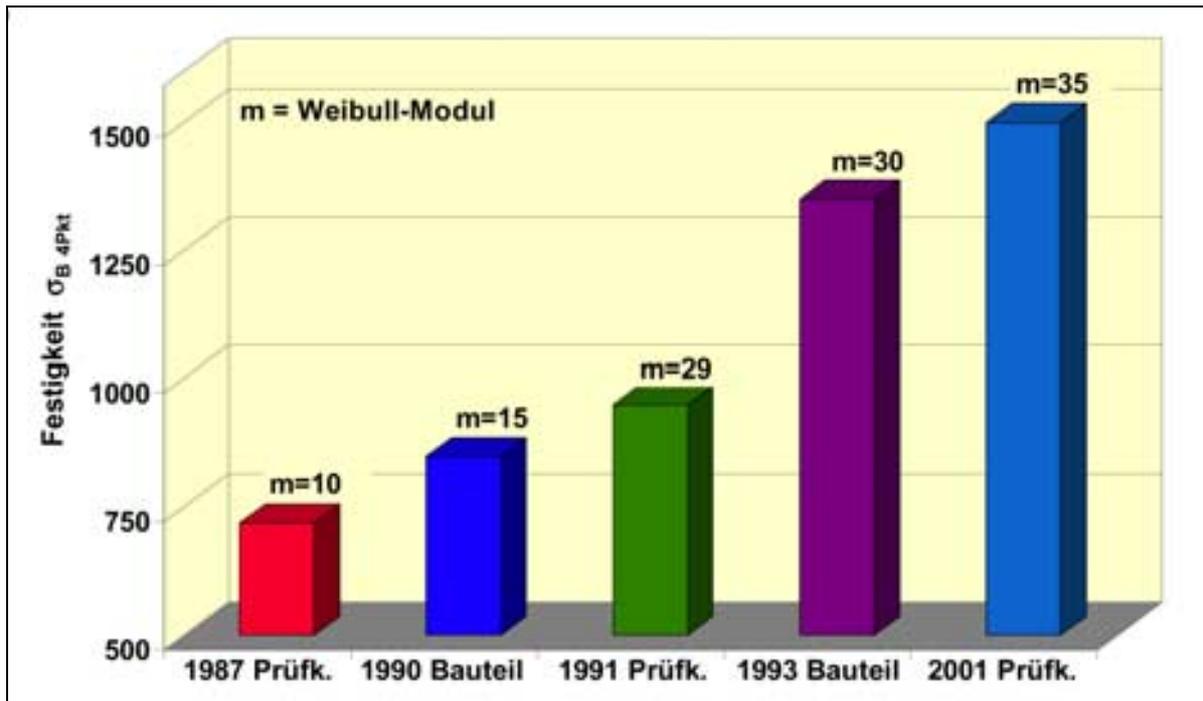


Bild 42: Entwicklung der Werkstoffeigenschaften am Beispiel von Siliciumnitrid (GPSN)

Neben der Herstellungsparametern bieten sich aber noch andere Möglichkeiten an, Festigkeit und Zuverlässigkeit zu verbessern:

Es bieten sich an:

- Verwendung extrem feiner und reiner Pulver (Nanoteilchen)
- Neue Herstellungstechnologien (Gelcasting, reaktionsgebundenes Aluminiumoxid etc.)
- Umwandlungsverstärkung
- Faser-/ Whiskerverstärkung
- Mischkeramiken (Metall + Keramik)



SiC-Preform in Motorblock eingegossen

Bild 43: Verbesserungspotentiale für neue Werkstoffe

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



Bild 44: Prüfung von Hüftgelenkkugeln

So umfaßt z.B. die Herstellung eines Pin-Grid-Arrays 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, um damit 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!