2. Vortragsblock 1

2.1 Einführung und Marktübersicht

- Dr.-Ing. Detlev Nicklas
  Verband der Keramischen Industrie e.V.
  Selb

Die Folien finden Sie ab Seite 39.

2.1.1. Keramik in der Geschichte

Nach Erfindung der Dampfmaschine im 18. Jahrhundert ersetzten Eisen und Stahl zunehmend den bis dahin dominierenden Werkstoff Holz. Parallel dazu entwickelten sich Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts neue Fertigungstechnologien und der Bedarf an elektrischer Energie nahm überproportional zu. Dieser technische Fortschritt führte u. a. zu einer anhaltenden Suche nach neuen, geeigneten Werkstoffen.
Dabei entdeckten die Entwicklungsingenieure unter anderem den Werkstoff Keramik neu!

Erste Dokumentationen für den Einsatz von Keramik in der Technik finden sich am Anfang des 19. Jahrhunderts. So werden, z. B. ab dem Jahr 1849, erstmals Porzellane für die Isolation an Telegrafenmastleitungen im größeren Umfang eingesetzt.

Heute, nach einer über einhundertfünfzigjähriger Entwicklung, steht den Herstellern und Anwendern von Technischer Keramik eine Werkstoffvielfalt zur Verfügung, die es ohne weiteres mit den Werkstoffklassen der Metalle oder Kunststoffe aufnehmen kann (Bild 1).

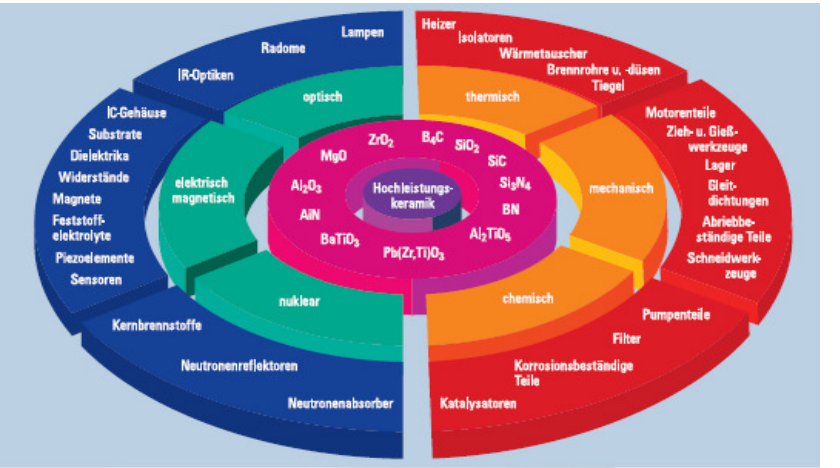


Bild 1: Auswahl von Keramische Werkstoffen, Eigenschaften und Anwendungsfeldern

2.1.2. Definitionen / Nomenklatur

Unter dem Begriff Keramik (griechisch: Erden) wird ein nichtmetallischer und anorganischer Werkstoff verstanden, der im Allgemeinen seine Formgebung bei Raumtemperatur erhält und typische Werkstoffeigenschaften durch eine spezielle Temperaturbehandlung (Brennen/Sintern) erfährt.

Entsprechend der mineralogischen bzw. chemischen Zusammensetzung werden dabei die keramischen Werkstoffe in drei Hauptgruppen unterteilt (Bild 2).

Bild 2: Werkstoffhauptgruppen der Technischen Keramik

2.1.3. Die Werkstoffgruppen mit ihren Eigenschaftsmerkmalen

Silikatkeramik als die "älteste Gruppe" aller Keramiken besitzt sie auch heute noch einen dominierenden Anteil an allen feinkeramischen Erzeugnissen. Wesentliche Bestandteile dieser mehrphasigen Werkstoffgruppe sind Ton und Kaolin sowie Feldspat und Speckstein als Silikatträger. Daneben werden auch Komponenten wie Tonerde und Zirkon zur Erzielung spezieller Werkstoffeigenschaften, z. B. für eine höhere Festigkeit, verwendet. Im Brennprozess entstehen neben den kristallinen Phasen meist ein hoher Anteil an Glasphase (> 20 %), deren wesentlicher Bestandteil Siliziumoxid (SiO_2) ist. Zu den bekanntesten Werkstoffen der Silikatkeramik zählen:

- Porzellan,
- Steatit,
- Cordierit und
- Mullit.

Wegen der relativ niedriger Sintertemperaturen, der guter Prozessbeherrschung und der hoher Verfügbarkeit der natürlichen Rohstoffe sind Produkte aus Silikatkeramik im Allgemeinen kostengünstiger als Produkte aus Oxid- oder Nichtoxidkeramik. Letztere benötigen aufwändig hergestellte synthetische Pulver und entsprechend höhere Brenntemperaturen.

Produkte aus Silikatkeramik kommen in der Wärmetechnik, der Mess- und Regeltechnik, der Verfahrens- und Umwelttechnik, der Hoch- und Niederspannungstechnik mit typischen Anwendungen, wie Isolatoren, Sicherungspatronen, Katalysatoren, Gehäusen sowie bei vielfältigen Anwendungen in der Elektroinstallationstechnik zum Einsatz. Silikatkeramik findet sich weiterhin im Feuerfestbereich wieder.

Oxidkeramiken bestehen im Wesentlichen aus einphasigen und einkomponentigen Metalloxiden (> 90 %). Die Materialien sind glasphasearm oder glasphasefrei. Die Rohstoffe werden synthetisch hergestellt und besitzen einen hohen Reinheitsgrad. Bei sehr hohen Sintertemperaturen entstehen gleichmäßige Mikrogefüge, die für die verbesserten Eigenschaften verantwortlich sind. Wichtige Vertreter der Oxidkeramik sind

- Aluminiumoxid
- Magnesiumoxid,
- Zirkoniumoxid und
- Titandioxid

Oxidkeramiken kommen in der Elektrotechnik und Elektronik und vielfach als Strukturwerkstoff, also für nichtelektrische Anwendungen, zum Einsatz. Sie bietet die dafür geeigneten typischen Materialeigenschaften wie Bruchzähigkeit, Verschleiß- und Hochtemperaturfestigkeit sowie eine hohe Korrosionsbeständigkeit.

Nichtoxidkeramik - gegenüber den Oxidkeramiken zeichnen sich Nichtoxidkeramiken durch höhere kovalente und geringere ionische Bindungsanteile aus und stellen eine Werkstoffgruppe auf der Basis der Verbindungen von Bor, Kohlenstoff, Stickstoff und Silicium dar. (Kohlenstoffprodukte aus amorphem Graphit gehören **nicht** dazu!). Bedingt durch die starken Bindungsenergien im Werkstoff ergeben sich hohe chemische und thermische Stabilität, Härte und Festigkeit.

Bekannte Nichtoxidkeramiken sind das:

- Siliciumcarbid,
- Siliciumnitrid,
- Aluminiumnitrid,
- Borcarbid und
- Bornitrid.

Nichtoxidkeramiken eignen sich ideal für Anforderungen in den verschiedensten Industriebereichen (z. B. der chemische- und metallurgische Industrie, Maschinen- und Anlagenbau, keramische Schneidwerkzeuge etc.).

2.1.4. Wichtige Werkstoffgruppenvertreter mit ihren typischen Eigenschaftsmerkmalen und Anwendungsmöglichkeiten (Beispiele)

2.1.4.1. Silicatkeramiken

Steatitkeramik - ein natürliches Magnesiumsilikat mit Zusätzen von Ton und Feldspat bzw. Bariumcarbonat. 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 wird in der internationalen Normung als *"Steatit mit niedrigem Verlustfaktor"* geführt und eignet sich damit nicht nur für Hochfrequenzbauteile, sondern wegen seiner guten Verarbeitbarkeit auch zur wirtschaftlichen Herstellung von Bauteilen mit dünnen und gleichmäßigen Wandstärken und engen Toleranzen. *Sondersteatit* besitzt beste mechanische und dielektrische Eigenschaften und findet seit

mehr als 100 Jahren vielfach Anwendung in der Elektrotechnik, bei elektronischen Bauteilen und in der Wärmetechnik. Typische Anwendungen sind Sockel, Reglergehäuse, Isolierperlen, NH-Sicherungen und Grundplatten etc.

Cordieritkeramiken – ein Magnesiumaluminiumsilikat, welches direkt beim Sintern von Speckstein mit Zusätzen von Ton, Kaolin, Schamotte, Korund und Mullit entstehen. Cordierite haben einen niedrigen Wärmedehnungskoeffizienten. Daraus resultiert eine hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit bei guter mechanischer Festigkeit. Unterschieden wird zwischen *porösem* und *dichtem Cordierit*. Die *porösen Varianten* haben gegenüber den dichten eine niedrige Biegefestigkeit, aber dafür auch eine noch höhere Temperaturwechselbeständigkeit, da sich mechanische Spannungen in den Poren abbauen können. Cordierite sind bei Temperaturen bis 1.000 °C bzw. 1.200 °C indifferent gegen Heizleiterlegierungen (keine Reaktion zwischen Heizleiter und Keramik). Deshalb werden sie in der Elektrowärmetechnik und ganz allgemein in der Wärmetechnik eingesetzt. Anwendungsbeispiele sind z. B. Isolierkörper für elektrische Durchlauferhitzer, Heizleiterrohre, Heizleiterträger in Öfen, Gliederheizkörper, Heizpatronen für Lötkolben, Gasbrennereinsätze, Funkenschutzkammern sowie Katalysatorträger im PKW.
Für Sonderzwecke bietet sich ein cordierit- und mullithaltiger Werkstoff mit hohem Aluminiumoxidgehalt (C 530) an, der noch höhere Anwendungstemperaturen ermöglicht.

2.1.4.2. Oxidkeramiken

Aluminiumoxid ist der derzeit der am meisten genutzte oxidkeramische Werkstoff in der Praxis, der mit seinen Produkten ein großes Anwendungsspektrum abdeckt. Dicht gesintertes Aluminiumoxid zeichnet sich durch

- hohe Festigkeit und Härte,
- Temperaturstabilität,
- hohe Verschleißbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit

auch bei hohen Einsatztemperaturen aus.

In der Praxis haben sich synthetisch hergestellten Werkstoffe mit Aluminiumoxidgehalten von mehr als 80 % bis hin zu > 99 % bewährt. Der Anteil des Aluminiumoxidgehaltes im Werkstoff wird dabei von

den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Produkt bestimmt.
Aluminiumoxidwerkstoffe erfüllen alle Bedingungen für Isolierstoffe bei Anwendungen in der Elektrotechnik. Durch ihre o. g. weiteren guten Materialeigenschaften empfehlen sie sich auch für den Einsatz bei mechanischen Anwendungen. Aufgrund ihres Preis-Leistungs-Verhältnisses ist ihr Einsatzgebiet dabei sehr umfangreich. Nachfolgend hierzu einige Beispiele:

- in der Sanitärindustrie als Dichtelement,
- in der Elektrotechnik als Isolierteil,
- in der Elektronik als Substrat (Leiterplatte),
- in der Maschinen- und Anlagenbau als Verschleißschutz (verschleißfestes Material),
- in der chemischen Industrie als Korrosionsschutz (korrosionsfestes Material, das bis zu hohen Temperaturen gegenüber Dämpfen, Schmelzen und Schlacken weitestgehend beständig ist) und als Filter,
- in der Messtechnik als Schutzrohr für Thermoelemente bei Hochtemperaturmessungen,
- in der Humanmedizin als Implantat und
- in der Hochtemperaturanwendung als Brennerdüse oder als Tragrohr für Heizleiter.

Das Zirkoniumoxid (Zirkonoxid) hat in den letzten Jahren eine zunehmende Marktbedeutung erlangt. Gründe hierfür sind seine:

- hoher Bruchzähigkeit,
- Wärmedehnung, ähnlich Gusseisen,
- höchster Biegebruch- und Zugfestigkeit,
- hoher Verschleißbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit,
- niedriger Wärmeleitfähigkeit,
- Sauerstoffionenleitfähigkeit und
- sehr guter tribologischer Eigenschaften (Gleitpaarungen).

Zirkoniumoxid tritt in monokliner, tetragonaler und kubischer Kristallmodifikation auf. Dicht gesinterte Bauteile lassen sich in der kubischen und/oder tetragonalen Kristallmodifikation herstellen. Folgende Zirkoniumoxidkeramiken werden heute in der Praxis verwendet:

- *Vollstabilisiertem Zirkoniumoxid* (**FSZ** – fully stabilized zirconia). Hier bleibt durch den Einbau von Fremdoxiden in das Kristallgitter die kubische Hochtemperaturstruktur auch nach dem Abkühlen erhalten. Der für den technischen Einsatz störende Volumensprung findet beim FSZ nicht statt.
- T*eilstabilisierte Zirkoniumoxid* (**PSZ** – partly stabilized zirconia) hat große technische Bedeutung. Hier liegt bei Raumtemperatur eine grobe kubische Phase mit tetragonalen Bereichen vor, die durch geeignete Prozessführung oder Anlassprozesse in ihrem Zustand metastabil erhalten wird. Dadurch wurde eine Umwandlung in die monokline Phase verhindert und das Gefüge "vorgespannt", was mit einer Festigkeits- und Zähigkeitssteigerung verbunden ist.
- P*olykristallinen tetragonalen Zirkoniumoxid* (**TZP** – tetragonal zirconia polycrystal). Hier wird durch die Verwendung von extrem feinen Ausgangspulvern und Anwendung von niedrigen Sintertemperaturen ein sehr feinkörniges Gefüge erreicht. Dieses Material zeichnet sich wegen seines extrem feinen Gefüges und der metastabilen tetragonalen Struktur durch außerordentlich hohe mechanische Festigkeit von bis über 1.500 MPa aus.

Die sehr fein ausgebildete tetragonale Kristallphase im *PSZ* und im *TZP* zeigt ein einzigartiges Phänomen im Bereich der Hochleistungskeramik. Nachfolgend eine kurze Erläuterung:

Die Umwandlung der tetragonalen Phase in die monokline kann in dieser Keramik durch Druck gehemmt werden. Bei Druckentlastung dieses Werkstoffes, z. B. durch Rissspitzen oder Zugeigenspannungen, tritt dann eine Umwandlung auf. Die druckgesteuerte Volumenzunahme bei der Kristallphasenumwandlung schließt Risse, verlangsamt oder verzweigt sie. Dieses Verhalten wird als Umwandlungsverstärkung technisch genutzt. Sie führt bei *PSZ*- und vor allem aber *TZP-Keramiken* zu extrem hoher Bauteilfestigkeit, welche in Abhängigkeit von der Stabilisierung für maximale Anwendungstemperaturen zwischen 600 °C und 1.100 °C genutzt werden kann. Zirkoniumoxide

werden daher bevorzugt für mechanisch hoch belastbare Komponenten eingesetzt.

Eine weitere werkstoffspezifische Eigenschaft ist seine Sauerstoffionenleitfähigkeit. Dieses Phänomen wird zur Messung von Sauerstoffpartialdrücken genutzt. So besteht z. B. die so genannte Lambdasonde für die Abgasregelung von Benzinmotoren aus Zirkoniumoxid.

2.1.4.3. Nichtoxidkeramiken

2.1.4.3.1. Carbide

Das Siliciumcarbid ist derzeit eine der wichtigsten Nichtoxidkeramiken in der Praxis, die, je nach Anwendungszweck, in diversen Varianten hergestellt wird. Produkte aus Siliciumcarbid zeichnen sich durch:

- eine sehr hohe Härte,
- eine gute Korrosionsbeständigkeit, Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen,
- eine hohe Verschleißbeständigkeit,
- eine gute Temperaturwechselbeständigkeit,
- eine geringen Wärmedehnung,
- eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit,
- gute tribologische Eigenschaften und
- Halbleitereigenschaften

aus.

Die typischen Anwendungseigenschaften kommen bei den unterschiedlichsten Werkstoffvarianten des Siliciumcarbides sehr speziell zur Anwendung. Je nach der Herstellungstechnik muss beim Siliciumcarbid zwischen artfremdgebundenen und arteigengebundenen Keramiken unterschieden werden, sowie zwischen offenporöser und dichter Keramik:

- *offenporöses Siliciumcarbid:*
  - silikatisch gebundenes Siliziumcarbid
  - rekristallisiertes Siliciumcarbid **(RSIC)**
  - nitrid- bzw. oxynitridgebundenes Siliciumcarbid **(NSIC)**

- *dichtes Siliciumcarbid:*
    - reaktionsgebundenes siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid **(SISIC)**
    - gesintertes Siliciumcarbid **(SSIC)**
    - heiß [isostatisch] gepresstes Siliciumcarbid **(HPSIC [HIPSIC])**
    - flüssigphasengesintertes Siliciumcarbid **(LPSIC)**

Silikatisch gebundenes Siliciumcarbid wird aus groben und mittelfeinen SiC-Pulvern hergestellt und mit ca. 5 bis 15 % alumosilikatischer Bindematrix unter Luftatmosphäre gebrannt. Die Festigkeiten, Korrosionsbeständigkeiten und vor allem die Hochtemperatureigenschaften werden durch die silikatische Bindematrix bestimmt und liegen daher unterhalb der nichtoxidisch gebundenen SiC-Keramiken. Bei sehr hohen Einsatztemperaturen beginnt die silikatische Bindematrix zu erweichen, der Werkstoff verformt sich unter Last bei hohen Temperaturen. Vorteil ist sein vergleichsweise geringer Herstellungsaufwand. Typische Anwendung findet dieser Werkstoff z. B. als Tellerkapsel beim Porzellanbrand.

*Flüssigphasengesintertes Siliciumcarbid **(LPSIC)*** ist ein dichter Werkstoff, der SiC und eine oxinitridische SiC-Mischphase sowie eine oxidische Sekundärphase enthält. Der Werkstoff wird aus Siliziumcarbidpulver und variierenden Mischungen von oxidkeramischen Pulvern, oft auf der Basis von Aluminiumoxid, hergestellt. Dabei sind die oxidischen Bestandteile für die gegenüber SSIC etwas höhere Dichte von ca. 3,24 g/cm^3 verantwortlich. Die Bauteile werden in einem Drucksinterverfahren bei einem Druck von 20–30 MPa und einer Temperatur von über 2.000 °C verdichtet.
Der Werkstoff zeichnet sich auch durch seine feinkörnige Matrix und dadurch, dass er praktisch porenfrei ist, durch sehr hohe Festigkeit und hohe Bruchzähigkeit aus. LPSIC liegt somit von den mechanischen Eigenschaften her gesehen zwischen dem SSIC und dem hochfest-„zähen“ Si_3N_4.

*Drucklos gesintertes Siliciumcarbid **(SSIC)*** wird aus gemahlenem SiC-Feinstpulver hergestellt, das mit Sinteradditiven versetzt, in den keramiküblichen Formgebungsvarianten verarbeitet und bei 2.000 bis 2.200 °C unter Schutzgas gesintert wird. Neben feinkörnigen Varianten sind auch grobkörnige erhältlich. SSIC zeichnet sich durch hohe Festigkeit aus, die bis zu sehr hohen Temperaturen (ca. 1.600 °C)

nahezu konstant bleibt und zwar dauerhaft! Dieser Werkstoff weist eine extrem hohe Korrosionsbeständigkeit gegenüber sauren und basischen Medien auf, denen er ebenfalls bis zu sehr hohen Temperaturen standhalten kann. Grobkörnige Varianten weisen hier Vorteile auf. Diese in der Gruppe der Hochtemperaturkeramiken herausragenden Eigenschaften werden durch eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit, hohe Verschleißbeständigkeit und eine diamantähnliche Härte ergänzt. Das SSIC ist daher für Anwendungen mit extremen Ansprüchen prädestiniert, z. B. für Gleitringdichtungen in Chemiepumpen, Gleitlager, Hochtemperaturbrennerdüsen oder auch Brennhilfsmittel für sehr hohe Anwendungstemperaturen. Die Verwendung von SSIC mit Grafiteinlagerungen steigert die Leistung von Tribosystemen.

Heiß gepresstes Siliciumcarbid ***(HPSIC)*** sowie *heiß isostatisch gepresstes Siliciumcarbid* ***(HIPSIC)*** weisen gegenüber dem *drucklos gesinterten SSIC* sogar noch höhere mechanische Kennwerte auf, da die Bauteile durch die zusätzliche Anwendung von mechanischen Pressdrücken bis zu ca. 2.000 bar während des Sintervorgangs nahezu porenfrei werden. Die axiale (HP) bzw. die isostatische (HIP) Presstechnik beschränkt die zu fertigenden Bauteile auf relativ einfache bzw. kleine Geometrien und bedeutet zusätzlichen Aufwand gegenüber dem drucklosen Sintern. HPSIC bzw. HIPSIC finden daher ausschließlich Anwendung in Bereichen extremster Beanspruchung.

Reaktionsgebundenes siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid ***(SISIC)*** besteht zu ca. 85 bis 94 % aus SiC und entsprechend aus 15 bis 6 % metallischem Silicium (Si). SISIC besitzt praktisch keine Restporosität. Dieses wird erreicht, indem ein Formkörper aus Siliciumcarbid und Kohlenstoff mit metallischem Silicium infiltriert wird. Die Reaktion zwischen flüssigem Silicium und dem Kohlenstoff führt zu einer SiC-Bindungsmatrix, der restliche Porenraum wird mit metallischem Silicium aufgefüllt. Vorteil dieser Herstellungstechnik ist, dass im Gegensatz zu den Pulversintertechniken die Bauteile während des Silizierungsprozesses keine Schwindungen erfahren. Daher können außerordentlich große Bauteile mit präzisen Abmessungen hergestellt werden. Der Einsatzbereich des SISIC ist aufgrund des Schmelzpunktes des metallischen Siliziums auf ca. 1.380 °C begrenzt. Bis zu diesem Temperaturbereich weist SISIC hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit, verbunden mit guter Temperaturwechselbeständigkeit und Verschleißbeständigkeit auf. SISIC ist daher prädestiniert als Werkstoff für hoch belastete Brennhilfsmittel (Balken, Rollen, Stützen etc.) und verschiedenste Brennerbauteile für direkte und indirekte Verbren-

nung (Flammrohre, Rekuperatoren und Strahlrohre).
Es findet aber auch im Maschinenbau bei hoch verschleißfesten und korrosionsbeständigen Bauteilen (Gleitringdichtungen) Anwendung.

Rekristallisiertes Siliciumcarbid ***(RSIC)*** ist ein reiner Siliciumcarbidwerkstoff mit ca. 11 bis 15 % offener Porosität. Diese Keramik wird bei sehr hohen Temperaturen von 2.300 bis 2.500 °C gebrannt, wobei sich ein Gemisch aus feinstem und grobem Pulver schwindungsfrei zu einer kompakten SiC-Matrix umwandelt. Bedingt durch seine offene Porosität hat das RSIC im Vergleich zu den dichten Siliciumcarbidkeramiken geringere Festigkeiten Das RSIC zeichnet sich infolge seiner Porosität durch eine hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit aus. Die schwindungsfreie Brenntechnik erlaubt analog zum SISIC die Herstellung großformatiger Bauteile, die vorwiegend als hoch belastbare Brennhilfsmittel (Balken, Rollen, Platten etc.) z. B. beim Porzellanbrand eingesetzt werden. Bedingt durch seine offene Porosität ist diese Keramik nicht dauerhaft oxidationsbeständig und unterliegt als Brennhilfsmittel oder auch als Heizelement einer gewissen Korrosion. Die maximale Anwendungstemperatur liegt zwischen 1.600 und 1.650 °C.

Nitridgebundenes Siliciumcarbid ***(NSIC)*** ist ein poröser Werkstoff, mit 10 bis 15 % Porosität und davon 1 bis 5 % offener Porosität, der schwindungsfrei hergestellt wird, indem ein Formkörper aus Siliciumcarbidgranulat und Si-Metallpulver in einer Stickstoffatmosphäre bei ca. 1.400 °C nitridiert. Dabei wandelt sich das anfänglich metallische Silicium zu Siliciumnitrid um und bildet damit eine Bindung zwischen den Siliciumcarbid-Körnern aus. Anschließend wird das Material oberhalb 1.200 °C einer oxidierenden Atmosphäre ausgesetzt. Das bewirkt die Entstehung einer dünnen Oxidationsschutzschicht in Form einer Glasschicht. Die Siliciumnitridmatrix bewirkt, dass Werkstücke aus NSIC durch NE-Metallschmelzen schlecht besetzbar sind. Wegen seiner gegenüber RSIC geringeren Porengröße weist NSIC eine um ca. 100 % höhere Biegebruchfestigkeit sowie eine bessere Oxidationsbeständigkeit auf und unterliegt aufgrund seiner besseren Oberflächenbeständigkeit keiner Verformung über die Einsatzdauer hinweg. Dieser Werkstoff ist hervorragend als hoch belastbares Brennhilfsmittel bis 1.500 °C geeignet.

Borcarbidkeramiken werden ähnlich wie die Siliciumcarbidkeramiken aus einem Submicron-B_4C-Pulver unter Inertgasatmosphäre bei Temperaturen oberhalb 2.000 °C drucklos gesintert **(SBC),** heiß gepresst

(HPBC) oder heißisostatisch verdichtet **(HIPBC)**. Borcarbidkeramiken zeichnen sich durch überragende Härte aus, die nur noch von kubischem Bornitrid und Diamant übertroffen wird. Die mechanischen Eigenschaften der Borcarbidkeramiken entsprechen in etwa denen der Siliciumcarbidkeramik, sie weisen aber vergleichsweise höhere Verschleißbeständigkeit auf. Die Kombination von sehr geringer Dichte (2,51 g/cm^3), hohen mechanischen Festigkeiten und Elastizitätskonstanten machen diese Keramiken insbesondere für den Bereich des ballistischen Schutzes interessant. Im Bereich der Hochtemperaturanwendungen können Borcarbidkeramiken nur bis maximal 1.000 °C an O_2-haltiger Atmosphäre eingesetzt werden, bei höheren Temperaturen würde diese Keramik überproportional schnell oxidieren.

2.1.4.3.1. Nitride

Siliciumnitrid spielt unter den Nitridkeramiken eine derzeit klar dominierende Rolle und verfügt über eine bislang von anderen Keramiken nicht erreichte Kombination von hervorragenden Werkstoffeigenschaften wie die:

- hohe Zähigkeit,
- hohe Festigkeit bei hohen Einsatztemperaturen,
- ausgezeichnete Temperaturwechselbeständigkeit,
- hervorragende Verschleißbeständigkeit,
- niedrige Wärmedehnung,
- mittlere Wärmeleitfähigkeit und
- gute chemische Beständigkeit.

Diese Eigenschaftskombinationen ergibt eine Keramik, die auch extremsten Einsatzbedingungen gerecht wird. Siliciumnitridkeramik ist somit prädestiniert für Maschinenbauteile mit sehr hohen dynamischen Beanspruchungen und Zuverlässigkeitsanforderungen. Um dichte Siliciumnitridkeramik herzustellen, wird von einem mit Sinteradditiven versetzten Submicron-Si_3N_4-Pulver ausgegangen, das nach dem Formgebungsprozess bei Temperaturen zwischen 1.750 bis 1.950 °C gesintert wird. Bedingt durch die Zersetzung von Si_3N_4 - ab ca. 1.700 °C bei Normaldruck der Sinteratmosphäre - wird während des Sinterns der N_2-Druck erhöht, um der Zersetzung entgegenzuwirken.

Eine relativ kostengünstige Variante ist *niederdruckgesintertes Siliciumnitrid* ***(SSN),*** das mittlere Biegefestigkeiten aufweist und aus dem sich großvolumige Bauteile, z. B. für die Metallurgie herstellen lassen.

Das *gasdruckgesinterte Siliciumnitrid* ***(GPSSN)*** wird in einem Gasdrucksinterofen bei einem N_2-Überdruck bis zu 100 bar gesintert. Dadurch entsteht ein leistungsfähiger Werkstoff für hohe mechanische Belastungen.

Noch höhere Drücke bis zu 2.000 bar erfahren während des Sinterprozesses das *heiß gepresste* und das *heiß isostatisch gepresste Siliciumnitrid* ***(HPSN*** *bzw.* ***HIPSN)***. HPSN und HIPSN zeichnen sich durch noch höhere Festigkeiten im Vergleich zu GPSSN aus, da die hohen mechanischen Drücke im Herstellungsprozess die Restporosität nahezu vollständig beseitigen. Nachteilig sind die eingeschränkten Geometrien beim axial gepressten HPSN (mechanischer Pressstempel) sowie sehr hohe Prozesskosten beim HIPSN. Wichtige Einsatzgebiete für Teile aus diesen dichten Siliciumnitridwerkstoffen sind die Metallbearbeitung mit Schneidwerkstoffen (Wendeschneidplatten), die Wälzlagertechnik mit Kugeln, Rollen und Ringen und der Maschinenbau mit hoch belasteten Maschinenelementen. Der Einzug solcher Teile auch in den Bereich der Umformtechnik demonstriert die Leistungsfähigkeit dieser Werkstoffe.

Das *reaktionsgebundene Siliciumnitrid* ***(RBSN)*** wird nach einem völlig anderen Herstellungsprozess gefertigt. Hier wird alternativ zum kostenintensiven Si_3N_4-Pulver das vergleichsweise preiswerte Si-Pulver als Rohstoff verwendet, geformt und in N_2-Atmosphäre bei Temperaturen von ca. 1.400 °C zu Si_3N_4 nitridiert, und zwar schwindungsfrei! Die resultierende Keramik weist gute mechanische Kennwerte auf, ist aber durch ihre sehr feine und offene Porosität hochtemperaturoxidationsempfindlich. Anwendungsbeispiele für RBSN sind Brennhilfsmittel, Schmelztiegel und Schmelzkokillen, z. B. für die Herstellung von Siliciumbauelementen für die Solartechnik.
Werden dem Si-Pulver zusätzlich Sinteradditive zugegeben, kann das nitridierte Si_3N_4 anschließend dicht gesintert werden ***(gesintertes RBSN = SRBSN)***. Beide Werkstoffvarianten eignen sich allerdings prozessbedingt nur für Bauteile mit Wandstärken von maximal 20 mm.

Keramiken aus **Aluminiumnitrid** bestechen durch ihre hohe Wärmeleitfähigkeit, wobei 180 $Wm^{-1}K^{-1}$ der Standardwert ist, aber auch Werte von > 220 $Wm^{-1}K^{-1}$ erreicht werden können. Kombiniert mit der gu-

ten elektrischen Isolierfähigkeit eignet sich Aluminiumnitrid hervorragend für elektrotechnische Anwendungen. Hinzu kommt, dass sich Aluminiumnitridkeramik mit allen gängigen Verfahren metallisieren lässt und dadurch für Hart- oder Weichlöten vorbereitet werden kann. Da die Temperaturausdehnung von Aluminiumnitrid mit der von Silizium vergleichbar ist, bleiben bei thermisch belasteten Lötverbindungen mechanische Spannungen zwischen diesen beiden Werkstoffen besonders klein. Wegen seiner Weiterverarbeitbarkeit mittels Dickschichttechnik und Dünnschichttechnik sowie der möglichen Kupferbeschichtung im **DCB-Verfahren** (direkt copper bonding) und dem **AMB-Verfahren** (active metall brazing) für > 1 mm hohe Leiterbahnen ist Aluminiumnitrid z. B. ein idealer Werkstoff für die Telekommunikationstechnik.
Aus Aluminiumnitridkeramik werden Substrate für Halbleiterbauelemente sowie für Leistungselektronikbausteine, Gehäuse oder Kühlkörper gefertigt. Hohe Resistenz gegen Gase, wie sie bei der Verarbeitung von Silicium-Wafern verwendet werden, sorgt für eine weite Verbreitung von Aluminiumnitridkeramik auch auf diesem Sektor.

Aluminiumnitridkeramik ist dann für eine Anwendung besonders geeignet, wenn

- sehr hohe Wärmeleitfähigkeit,
- hohes elektrisches Isolationsvermögen und
- thermische Ausdehnung ähnlich Si (< Al_2O_3) notwendig sind oder
- ein inertes Verhalten gegen Schmelzen der III-V-Verbindungen gefordert wird.

Weniger geeignet ist Aluminiumnitridkeramik für Anwendungen bei Temperaturen über 1.000 °C in wasser- oder sauerstoffhaltiger Umgebung oder unter mechanischer Belastung mit gleichzeitiger Benetzung durch Wasser.

2.1.5. Marktüberblick

Technische Keramik wird heute zu Recht als Problemlöser charakterisiert, denn der Markt dieses Werkstoffes liegt in der Wahrnehmung vieler Anwendern vorzugsweise dort, wo konventionelle Werkstoffe

versagen und/oder sich durch den Einsatz der Keramik ein Zugewinn an Funktionalität und Wirtschaftlichkeit erzielen lassen.

Nicht so bekannt ist, dass für viele Schlüsseltechnologien – und -techniken (z. B. der Mikro- und Biotechnologie, der Medizin- und Informationstechnik) die Verwendung von keramischen Erzeugnissen verfahrenstechnisch eine Notwendigkeit und somit die Technische Keramik ein Garant für den wirtschaftlichen Erfolg dieser Industrien darstellt.

Weltweit wird mit größter Intensität an der Neu- und Weiterentwicklung von keramischen Werkstoffen gearbeitet, wobei insbesondere in Europa, den USA und Japan in großem Umfang vorwiegend anwenderorientierte Projekte durchgeführt werden. Aufgrund dessen und der zunehmenden Investitionsbereitschaft (Anwender, Pulver- und Keramikhersteller) ist davon auszugehen, dass der Technischen Keramik für die Zukunft eine noch größere marktstrategische Bedeutung beigemessen wird.

Derzeit hat die Technische Keramik am “Gesamtmarkt Keramik“ der führenden Industrienationen einen Anteil von ca. 37 % (davon > 50 % Elektronik). Die jährliche Wachstumsrate liegt in diesen Industrienationen bei bis zu 10 %. Experten gehen davon aus, dass diese Steigerungsrate nicht kleiner sondern eher zunehmen wird.

Die derzeit aktuellen Markdaten entnehmen Sie bitte den beigefügten Folien.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 26) finden sich auf den folgenden Seiten.

Einführung in die Technische Keramik

Marktüberblick

Dr. Detlev Nicklas
Verband der Keramischen Industrie e.V.
Fachgruppe Technische Keramik

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

2.1 Einführung und Markt - Folie 1

Vortragsgliederung

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

1. Einführung in die Technische Keramik

- Historischen Abschnitte in der Entwicklung der Keramik
- Heutige Definition / Nomenklatur für Technische Keramik
- Ausgewählte Werkstoffgruppenvertreter der Technischen Keramik mit Eigenschaftsmerkmalen und Applikationsbeispiele

2. Marktüberblick

- Wirtschaftliche Bedeutung der Technischen Keramik innerhalb der keramischen Industrie
- Wirtschaftliche Situation in Deutschland

2.1 Einführung und Markt - Folie 2

Vortragsgliederung

1. Einführung in die Technische Keramik

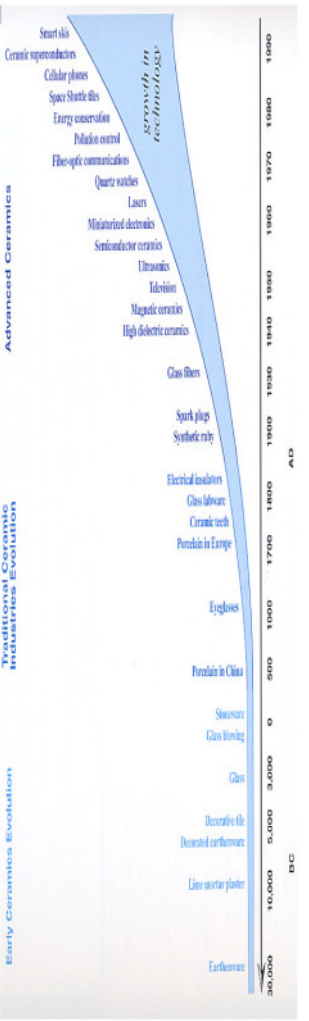
- Historischen Abschnitte in der Entwicklung der Keramik
- Heutige Definition / Nomenklatur für Technische Keramik
- Ausgewählte Werkstoffgruppenvertreter der Technischen Keramik mit Eigenschaftsmerkmalen und Applikationsbeispiele

2. Marktüberblick

- Wirtschaftliche Bedeutung der Technischen Keramik innerhalb der keramischen Industrie
- Wirtschaftliche Situation in Deutschland

Historische Entwicklungsabschnitte der Keramik aus Sicht der Technischen Keramik

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

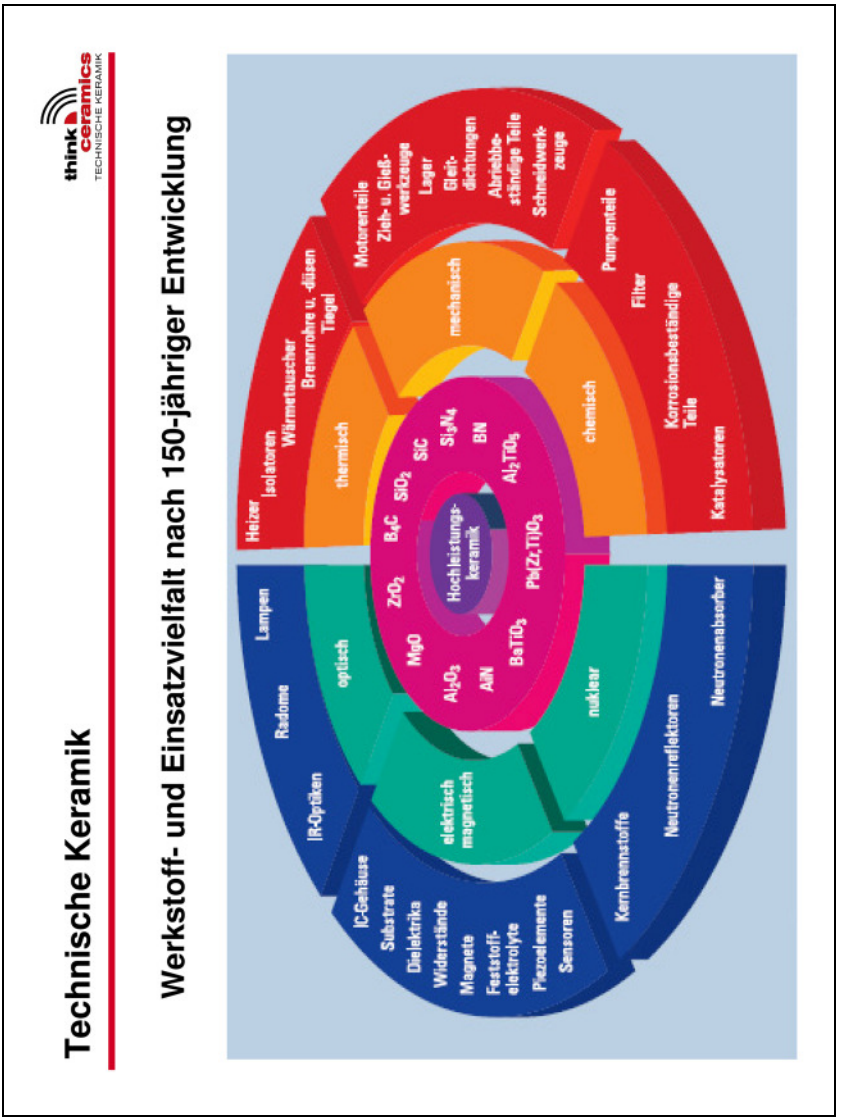


1. **Abschnitt - Frühkeramische Entwicklung**
   Zeitspanne: ..... ca. 30.000 Jahre v. u. Z. (?) – ca. 500 u. Z.
   Anwendungen: Ton- und Steinwaren

2. **Abschnitt - Traditionelle Keramik (erster industrieller Einsatz)**
   Zeitspanne: 500 u. Z. - erste Hälfte des 19. Jahrhunderts
   Anwendungen: Porzellan, erste Isolatoren aus Keramik

3. **Abschnitt - Hochentwickelte Keramik (Technische Keramik)**
   Zeitspanne: Mitte 19. / Anfang 20. Jahrhunderts bis .....
   Anwendungen: Entwicklungen von Oxid- und Nichtoxidkeramiken

2.1 Einführung und Markt - Folie 4



2.1 Einführung und Markt - Folie 5

Vortragsgliederung

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

1. Einführung in die Technische Keramik

- Historischen Abschnitte in der Entwicklung der Keramik
- Heutige Definition / Nomenklatur für Technische Keramik
- Ausgewählte Werkstoffgruppenvertreter der Technischen Keramik mit Eigenschaftsmerkmalen und Applikationsbeispiele

2. Marktüberblick

- Wirtschaftliche Bedeutung der Technischen Keramik innerhalb der keramischen Industrie
- Wirtschaftliche Situation in Deutschland

2.1 Einführung und Markt - Folie 6

Definition - Keramik

- **Keramik** **(deutschsprachiger Raum)**
  - anorganisch / nichtmetallisch
  - i. allg. Formgebung bei Raumtemperatur
  - typische Werkstoffeigenschaften durch Temperaturbehandlung (Sintern)

- ***Ceramics*** ***(angelsächsischer Sprachraum)***

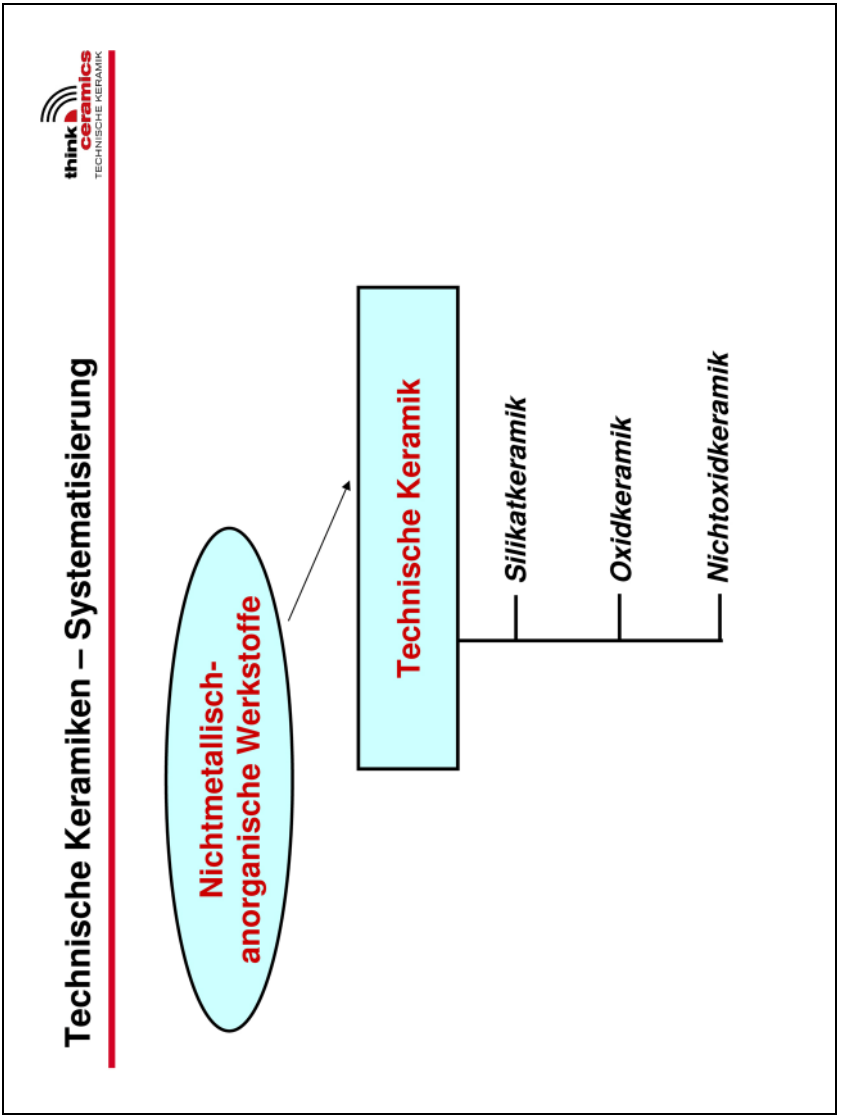
  alle keramischen Werkstoffe (siehe auch deutschsprachiger Raum)

  +

  - Gläser

  - Emaile

  - alle anorg. Bindemittel (Zement, Kalk, Gips etc.)



2.1 Einführung und Markt - Folie 8

Ausschnitt aus der Normung im Bereich der Technischen Keramik (1)

DIN EN ISO 13565-3 (08.00) Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastenschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 3: Beschreibung der Höhe von Oberflächen mit der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve

DIN EN 60672-1 (05.96) Keramik- und Glasisolierstoffe – Teil 1: Begriffe identisch mit IEC 60672-1 und Gruppeneinteilung

DIN EN 60672-2 (10.00) Keramik- und Glasisolierstoffe – Teil 2: Prüf- identisch mit IEC 60672-2 verfahren

DIN EN 60672-3 (02.99) Keramik- und Glasisolierstoffe – Teil: Anfor- identisch mit IEC 60672-3 derungen für einzelne Werkstoffe

DIN ISO 1101 (08.95) Technische Zeichnungen; Form- und Lagetolerierung; Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen; Allgemeines, Definitionen, Symbole, Zeichnungseintragungen

DIN ISO 2768-1 (06.91) Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung

DIN ISO 2768-2 (04.91) Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Form und Lage ohne einzelne Toleranzeintragung

DIN ISO 286-1 (11.90) ISO-System für Grenzmaße und Passungen; Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen

DIN ISO 286-2 (11.90) ISO-System für Grenzmaße und Passungen; Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen

DIN EN ISO 1302 (06.02) Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation

ISO 9000 (05.90) Qualitätsmanagement und Qualitätssicherungsnormen; Leitfaden zur Auswahl und Anwendung

ISO 15165 (10.01) Hochleistungskeramik; Klassifizierungssystem

DVS 3102 (02.93) Herstellen von Keramik-Keramik- und Keramik-Metall-Verbindungen durch Aktivlöten

VDI/VDE 2603 (09.90) Oberflächen-Messverfahren; Messung des Flächentraganteils

VDI/VDE 2604 (06.71) Oberflächen-Messverfahren; Rauheitsuntersuchung mittels Interferenzmikroskopie

Ausschnitt aus der Normung im Bereich der Technischen Keramik (2)

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

DIN 40680-1 (08.83) Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik; Allgemeintoleranzen für Maße

DIN 40680-2 (08.83) Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik; Allgemeintoleranzen für Form

DIN 40686-1 (08.83) Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Allgemeines

DIN 40686 Beiblatt 1 (08.83) Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Angabe in Zeichnungen

DIN 40686 Beiblatt 2 (08.83) Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Messungen der Rauheit

DIN 40686-4 (08.83) Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Prüfung von weichlötbaren Metallbelägen

DIN 40686-5 (08.83) Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Prüfung von hartlötbaren Metallbelägen

DIN 40686-6 (08.83) Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Hoch- und Niederspannungs-Isolatoren

DIN 40686-7 (08.83) Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Isolierteile

DIN EN 12212 (12.02) Hochleistungskeramik – Einheitliches Verfahren zur Klassifizierung

DIN V ENV 14232 (05.02) Hochleistungskeramik – Begriffe, Definitionen und Abkürzungen

DIN EN ISO 13565-1 (04.98) Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastenschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 1: Filterung und allgemeine Messbedingungen

DIN EN ISO 13565-2 (04.98) Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastenschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve

DIN EN ISO 13565-3 (08.00) Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastenschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 3: Beschreibung der Höhe von Oberflächen mit der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve

DIN EN 60672-1 (05.96) Keramik- und Glasisolierstoffe – Teil 1: Begriffe identisch mit IEC 60672-1 und Gruppeneinteilung

DIN EN 60672-2 (10.00) Keramik- und Glasisolierstoffe – Teil 2: Prüf- identisch mit IEC 60672-2 verfahren

DIN EN 60672-3 (02.99) Keramik- und Glasisolierstoffe – Teil: Anfor- identisch mit IEC 60672-3 derungen für einzelne Werkstoffe

Werkstoffe / Werkstoffgruppen der Technische Keramik

Silikatkeramik

- Alkali-Aluminiumsilikate (C 100)
- Magnesiumsilikate (C 200)
- Erdalkali-Aluminiumsilikate und Zirkonporzellane (C 400)
- Poröse Aluminiumsilikate und Magnesium-Aluminiumsilikate (C 500)
- Mullit-Keramik mit niedrigem Alkaligehalt (C 600)

Oxidkeramik

- Keramikwerkstoffe mit hohem Aluminiumoxidgehalt (C 700)
- Oxidkeramikwerkstoffe anderer Art (C 800)

Nichtoxidkeramik

- Carbide
- Nitride und „Nichtoxidische Keramikisolierstoffe“ (C 900)

Vortragsgliederung

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

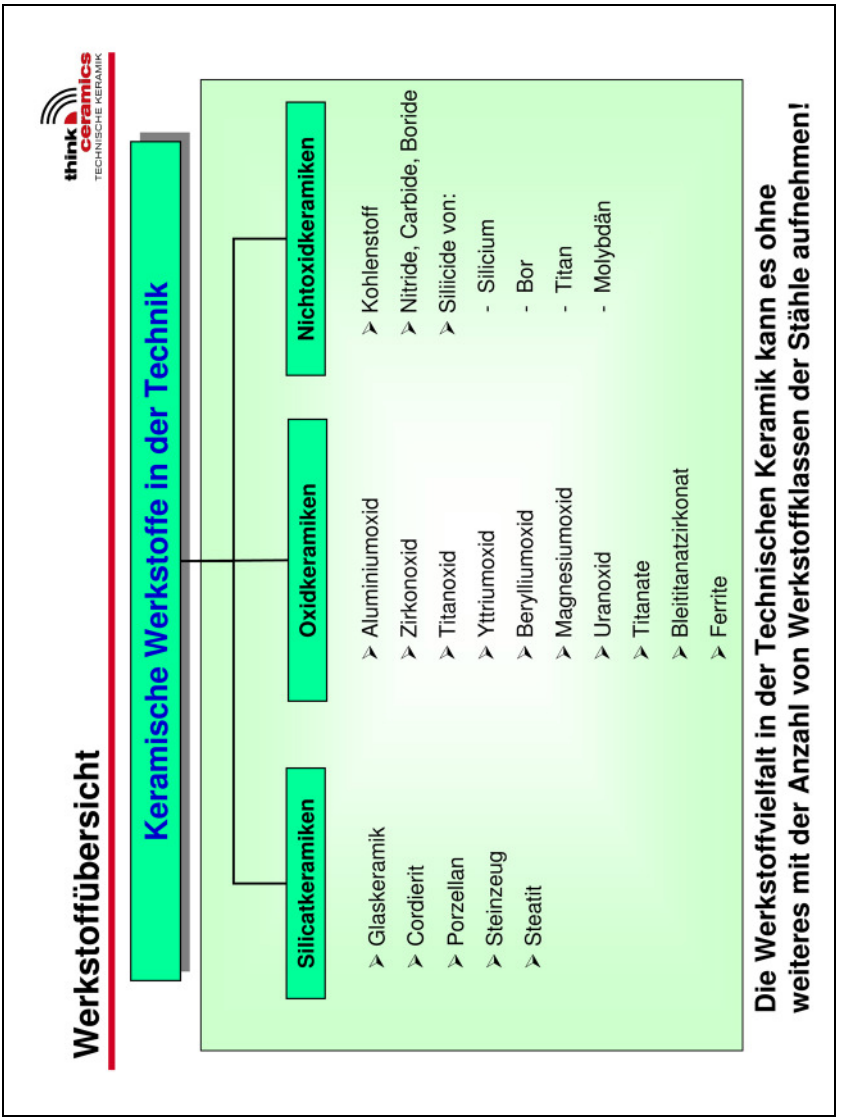
1. Einführung in die Technische Keramik

- Historischen Abschnitte in der Entwicklung der Keramik
- Heutige Definition / Nomenklatur für Technische Keramik
- Ausgewählte Werkstoffgruppenvertreter der Technischen Keramik mit Eigenschaftsmerkmalen und Applikationsbeispiele

2. Marktüberblick

- Wirtschaftliche Bedeutung der Technischen Keramik innerhalb der keramischen Industrie
- Wirtschaftliche Situation in Deutschland

2.1 Einführung und Markt - Folie 12



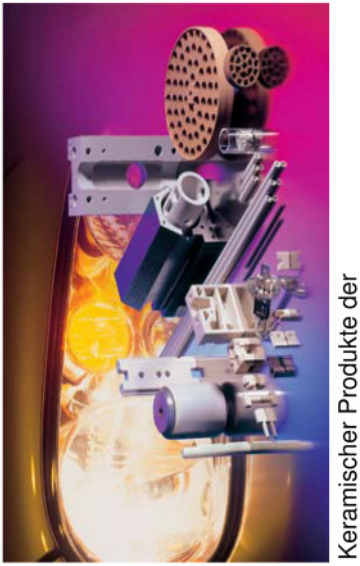
2.1 Einführung und Markt - Folie 13

Silikatkeramik am Beispiel Steatit
Technische Merkmale und Applikationen

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

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

Keramische Niederspannungsbauteile (Qualitätssicherung)

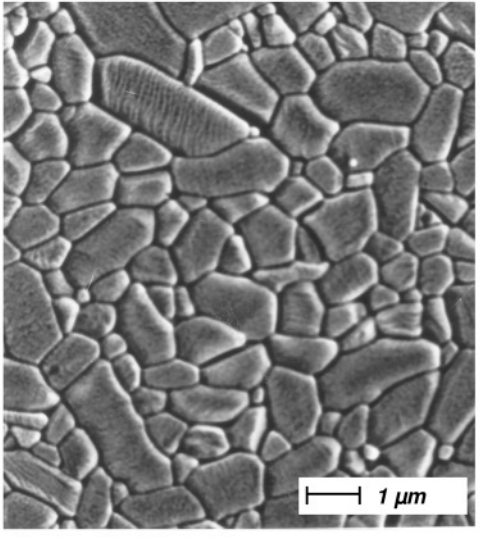


Keramischer Produkte der Elektrotechnik für den Automobilbau

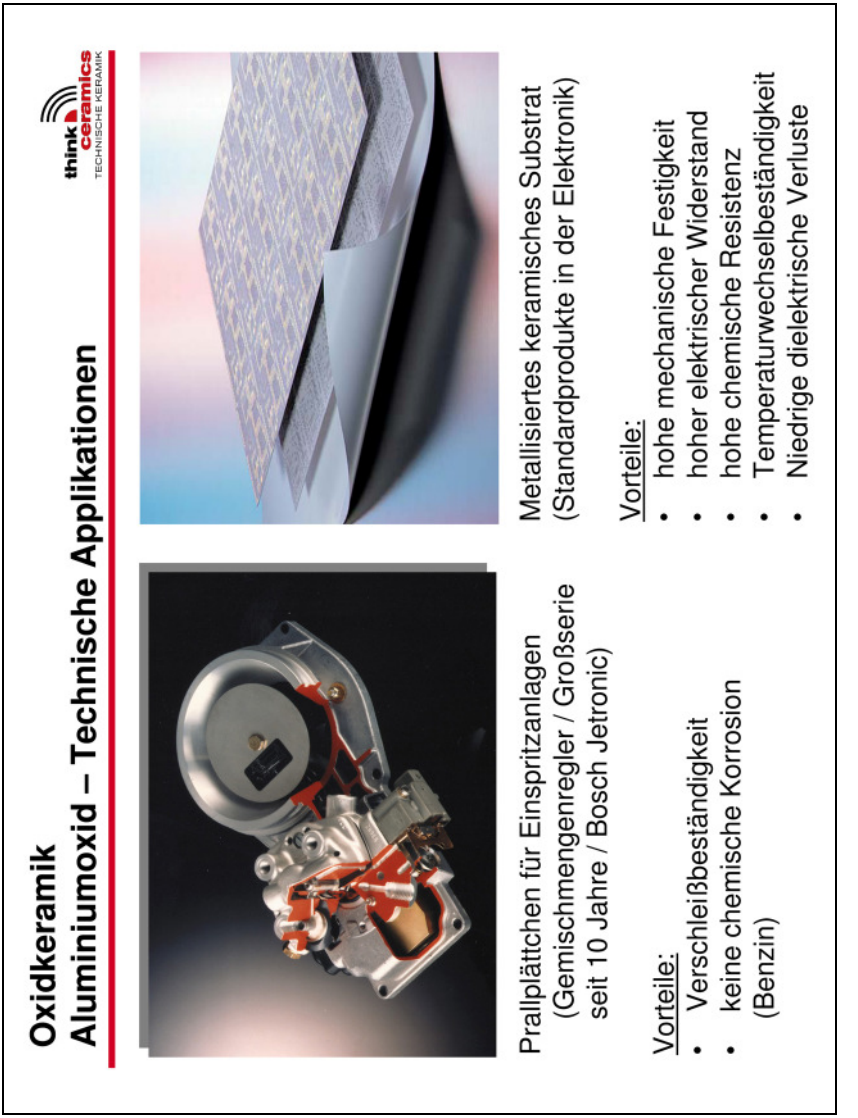
2.1 Einführung und Markt - Folie 14

Oxidkeramik am Beispiel Aluminiumoxid
Technische Merkmale

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



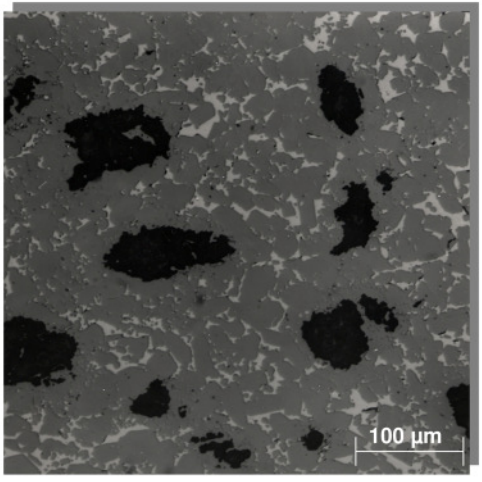
Gefüge Aluminiumoxid



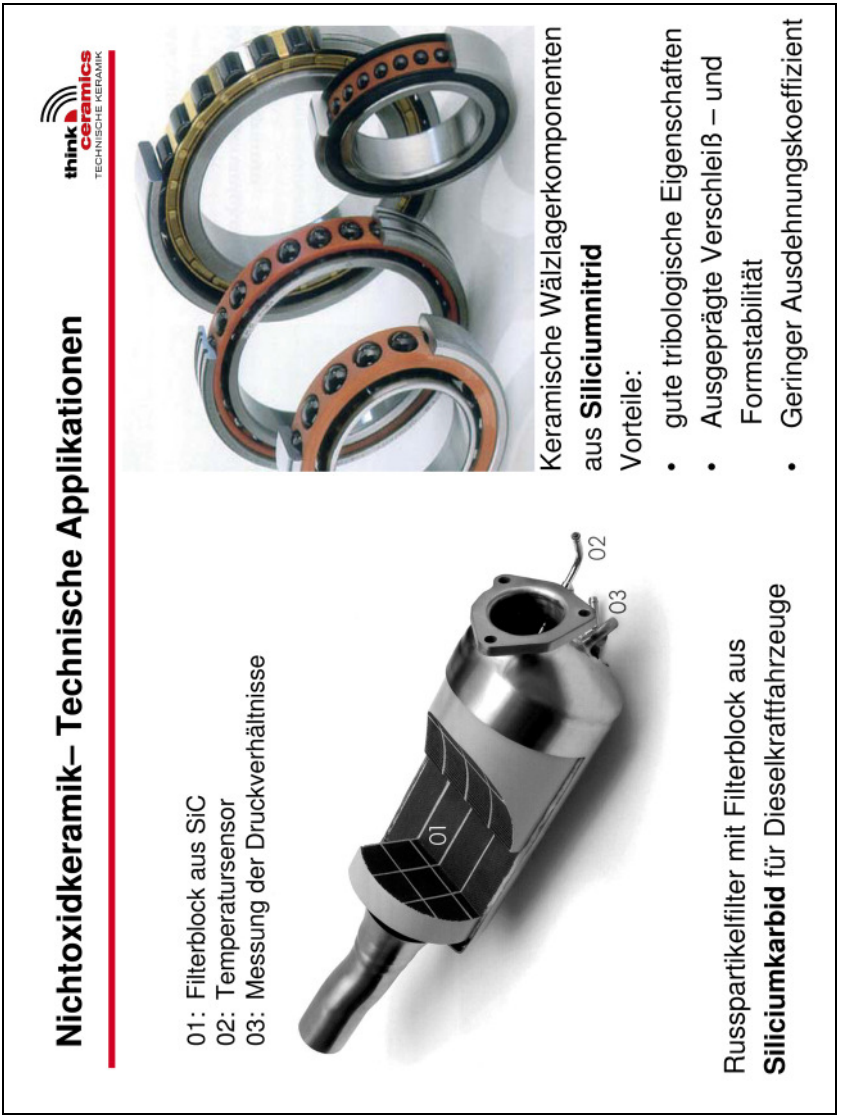
2.1 Einführung und Markt - Folie 16

Nichtoxidkeramik am Beispiel Siliciumcarbid
Wichtige Merkmale

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



Siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid
mit Kohlenstoffeinlagerungen (CSISIC)

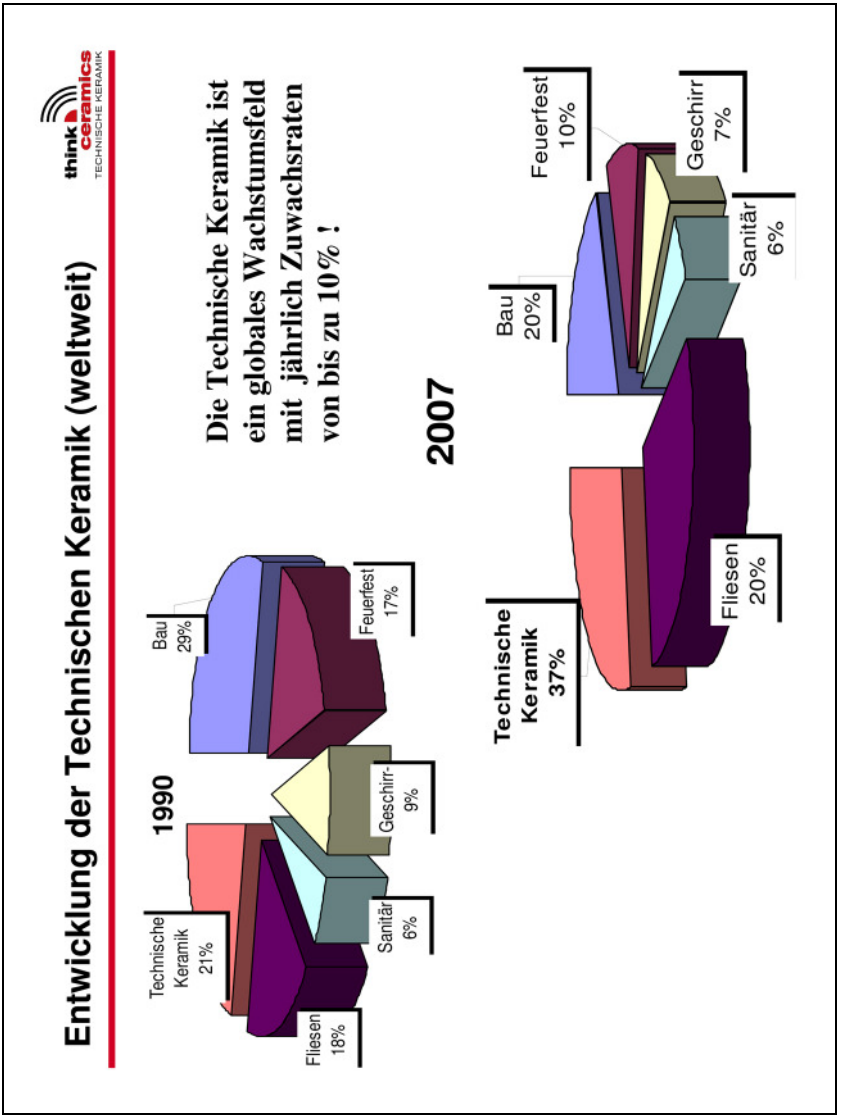


2.1 Einführung und Markt - Folie 18

Vortragsgliederung

1. **Einführung in die Technische Keramik**
   - Historischen Abschnitte in der Entwicklung der Keramik
   - Heutige Definition / Nomenklatur für Technische Keramik
   - Ausgewählte Werkstoffgruppenvertreter der Technischen Keramik mit Eigenschaftsmerkmalen und Applikationsbeispiele

2. **Marktüberblick**
   - Wirtschaftliche Bedeutung der Technischen Keramik innerhalb der keramischen Industrie
   - Wirtschaftliche Situation in Deutschland

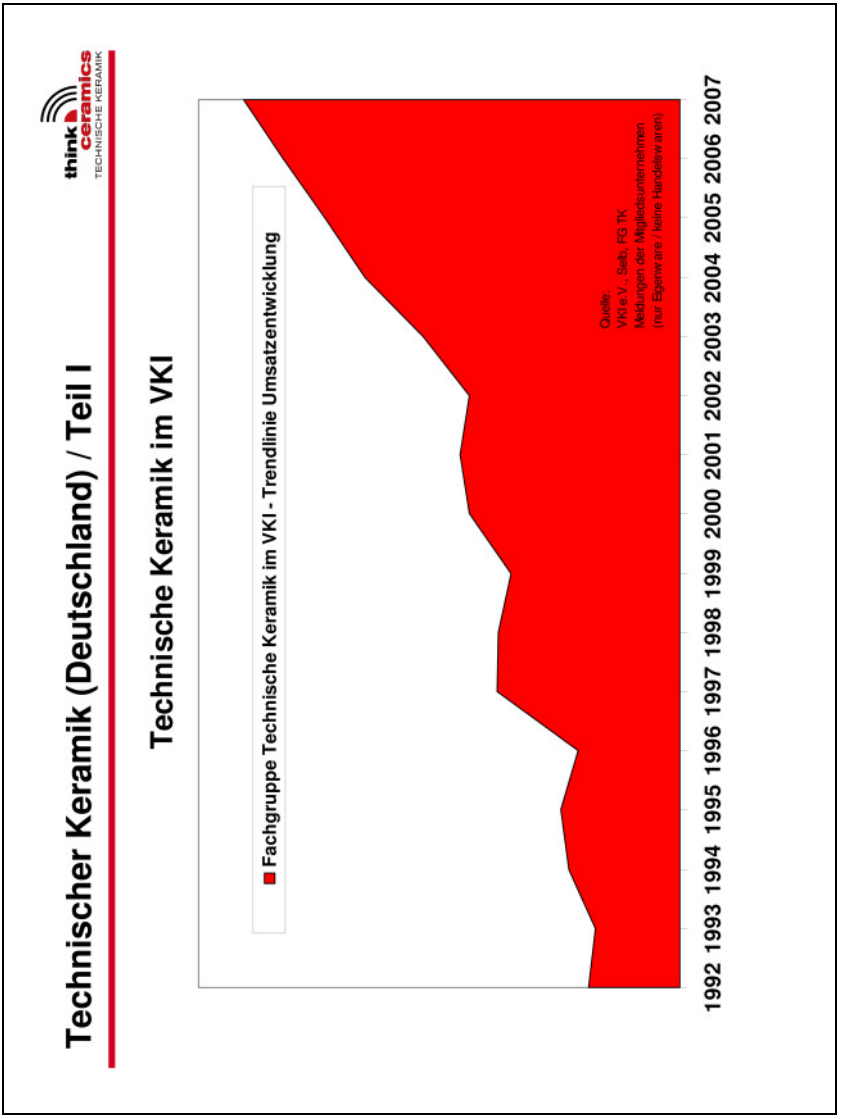


2.1 Einführung und Markt - Folie 20

Vortragsgliederung

1. **Einführung in die Technische Keramik**
   - Historischen Abschnitte in der Entwicklung der Keramik
   - Heutige Definition / Nomenklatur für Technische Keramik
   - Ausgewählte Werkstoffgruppenvertreter der Technischen Keramik mit Eigenschaftsmerkmalen und Applikationsbeispiele

2. **Marktüberblick**
   - Wirtschaftliche Bedeutung der Technischen Keramik innerhalb der keramischen Industrie
   - Wirtschaftliche Situation in Deutschland



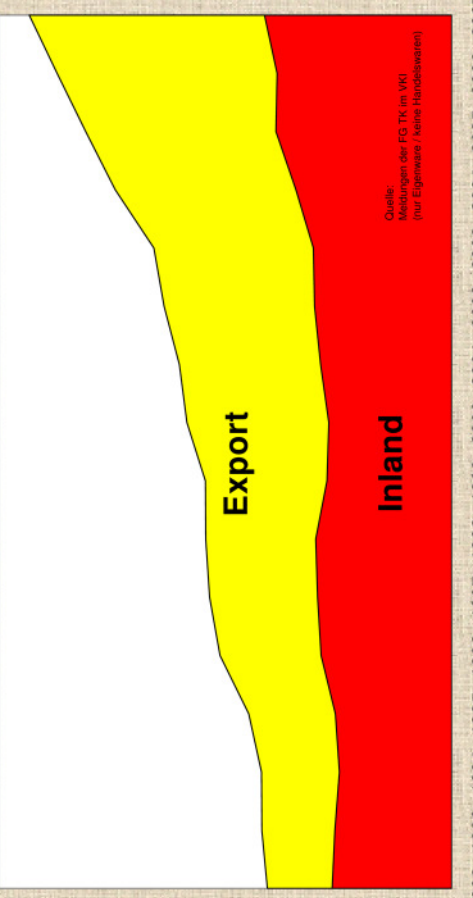
2.1 Einführung und Markt - Folie 22

Technischer Keramik (Deutschland) / Teil II

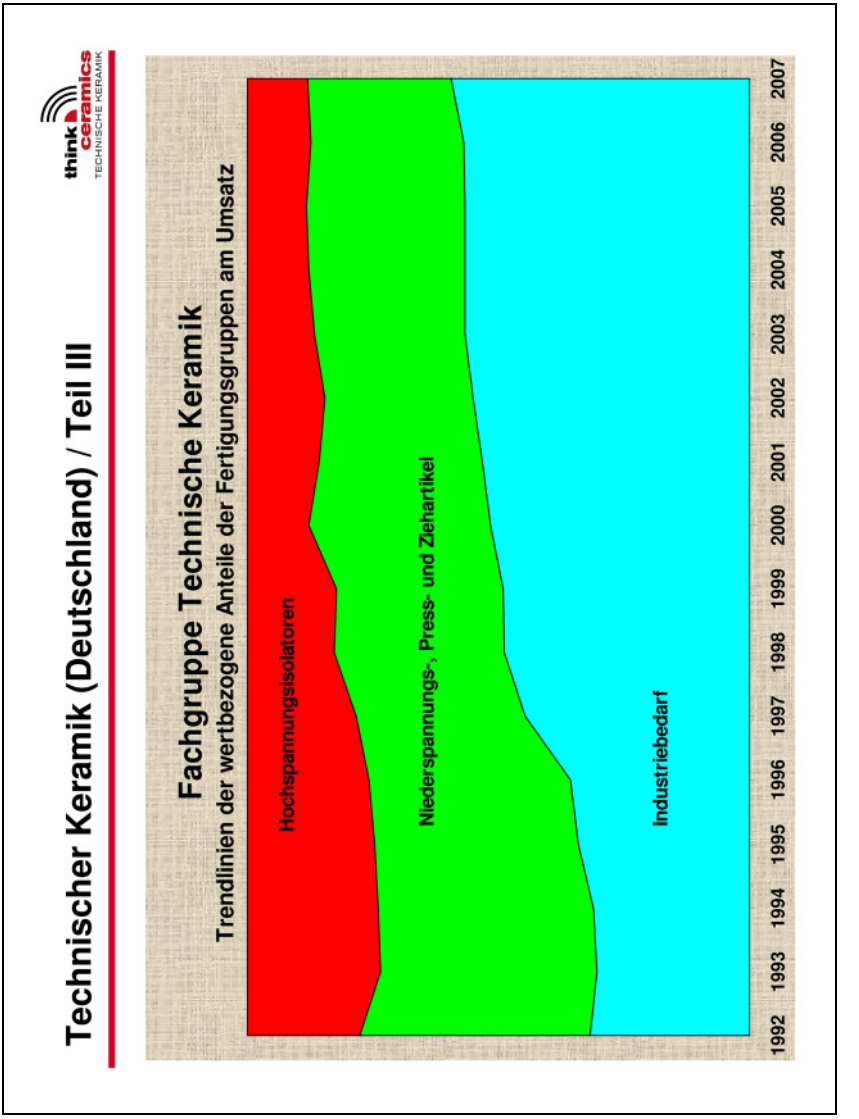
think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

Fachgruppe Technische Keramik im VKI

Trendlinie zur Entwicklung der Umsätze Inland (Deutschland) / Export

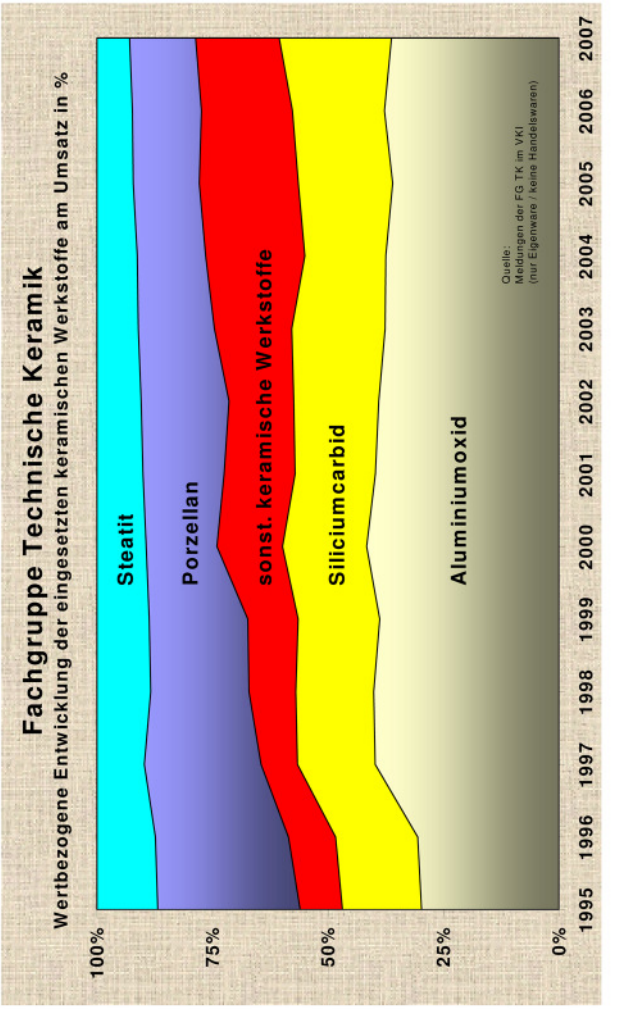


2.1 Einführung und Markt - Folie 23

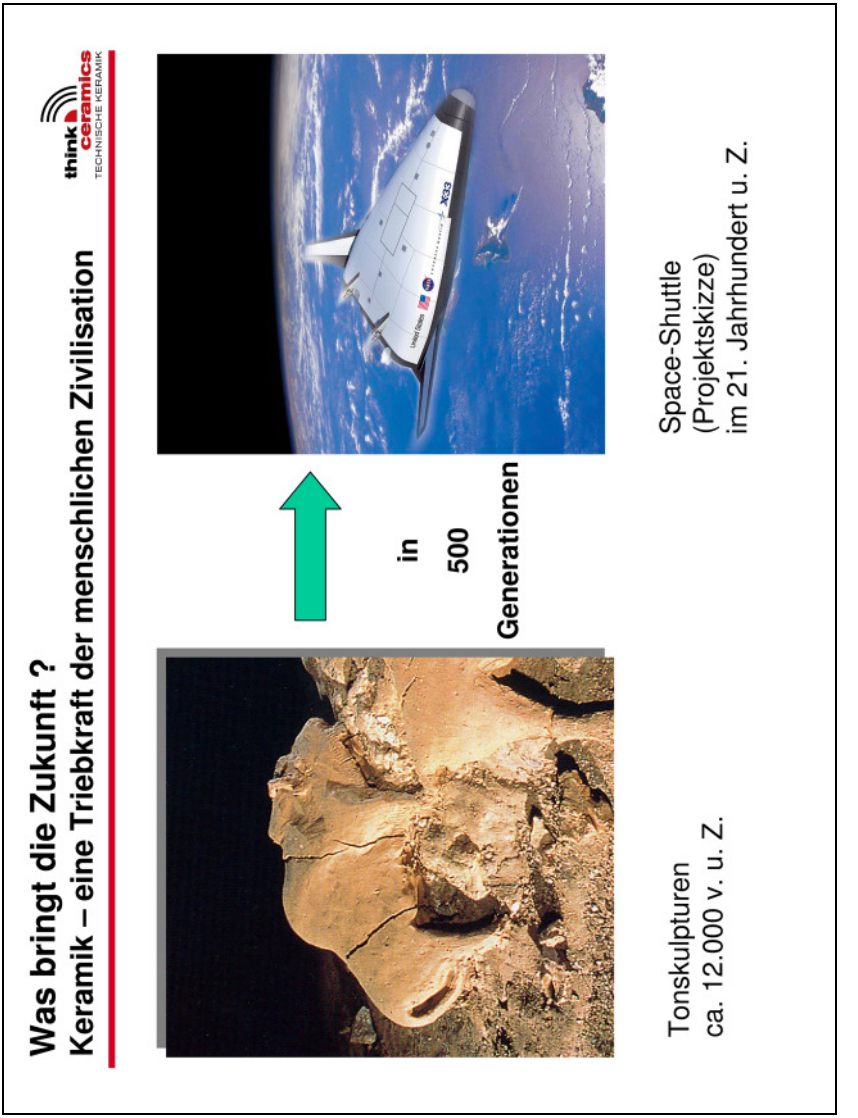


2.1 Einführung und Markt - Folie 24

Technischer Keramik (Deutschland) / Teil IV



2.1 Einführung und Markt - Folie 25



2.1 Einführung und Markt - Folie 26