

4. Kosten- und nutzenorientierte Auswahl silikatischer Werkstoffe

Kosten- und nutzenorientierte Auswahl silikatischer Werkstoffe

Dr. Ilka Lenke

CeramTec AG

Geschäftsbereich Elektrotechnik

Lauf a. d. Pegnitz

Geschichte der Keramik

Seit Jahrtausenden benützen die Menschen keramische Werkstoffe in Form von Tonwaren und Glas und in neuer Zeit das Porzellan. Der geschichtliche Ablauf ist übersichtlich kurz in Bild 1 zusammen gefaßt.



Geschichte der Keramik

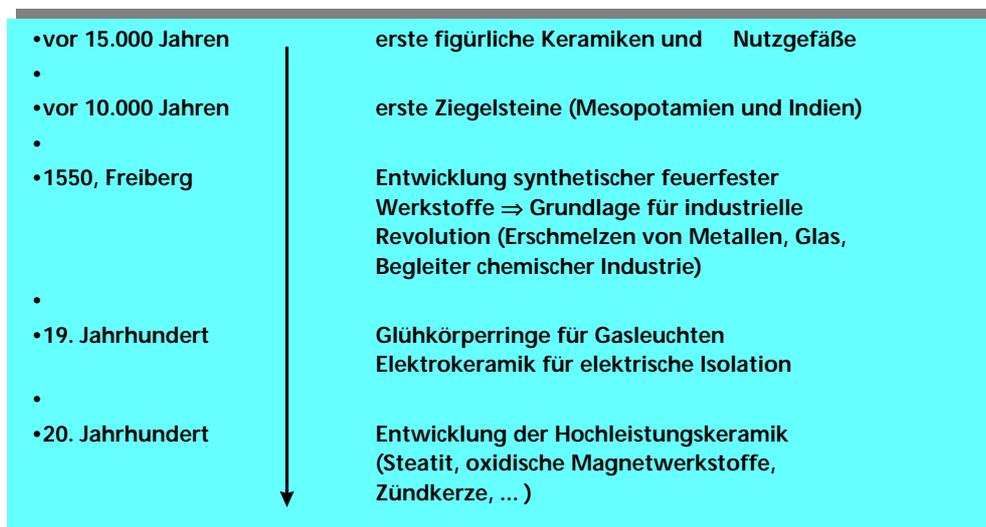


Bild 1: Geschichte der Keramik

Am Ende der Entwicklung stehen die heute überall in der Öffentlichkeit diskutierten Hochleistungskeramiken, ohne die unsere moderne Welt nicht denkbar wäre. Zu diesen Werkstoffen zählen auch die technischen Silicatkeramiken, die sich gegenüber den

herkömmlichen Anwendungen bei der Fliesenware, im Sanitärbereich und in der Geschirrinindustrie abheben.

Definition Silicatkeramik

Silicatkeramiken werden aus Naturprodukten wie Quarzsand, Speckstein, Kaolin, Ton, Feldspat usw. hergestellt. Rohstoffbasis für die meisten oxidischen und nichtoxidischen Keramiken sind dagegen im allgemeinen hochreine feindisperse Oxide, Nitride, Boride und Carbide mit genau spezifizierter chemischer Zusammensetzung und Teilchengometrie. Die dafür notwendigen Pulver müssen im allgemeinen synthetisch hergestellt werden, weil Naturprodukte nicht die Anforderungen bezüglich chemischer Reinheit, Homogenität und Konstanz erfüllen.

Die Silicatkeramiken weisen in der Regel ein äußerst komplexes Phasenverhalten auf. Sie lassen sich in der Regel nicht mehr mit den einfachen Hilfsmitteln der Phasendiagramme beschreiben.

Wegen relativ niedriger Sintertemperaturen, guter Prozeßbeherrschung und Verfügbarkeit der natürlichen Rohstoffe, sind die Silicatkeramiken wesentlich kostengünstiger als Oxid- und Nichtoxidkeramik.



Definition Silikatkeramik

- **Mehrphasige Werkstoffe**
- **Keramik mit kristallinen Phasen und hohem Anteil an Glasphase aus überwiegend Siliziumoxid**
- **Rohstoffe, meist natürlicher Herkunft (Ton, Kaolin, Feldspat und Speckstein), als Silikatträger**
- **niedrige Sintertemperaturen**

Bild 2: Definition Silicatkeramik

Werkstoffe und Anwendungen der Silicatkeramiken

Technische Porzellane

Quarzporzellan (P1)

Die Porzellane der Werkstoffgruppe C100 sind Alkali- Aluminiumsilikate und finden Ihre häufigsten Anwendungen wegen ihrer hohen mechanischen Festigkeit, dem sehr guten Isolationsvermögen und der hervorragenden chemischen Beständigkeit.

Für alle Anwendungen ohne besondere mechanische Beanspruchungen werden Quarzporzellane eingesetzt.

Tonerdeporzellan (RUBALIT® A12E)

Die Tonerdeporzellane zeichnen sich gegenüber dem Quarzporzellan durch eine höhere mechanische Festigkeit selbst bei extremen Dauerbelastungen (z. Bsp. -50°C bis $+550^{\circ}\text{C}$) oder plötzlicher Temperturänderung (z. Bsp. Elektrischer Kurzschluß) aus.

Auch im Langzeitverhalten unter Freiluftbedingungen (Alterungsverhalten) ist Tonerdeporzellan deutlich überlegen. Häufige Anwendungen sind in Freiluftschaltanlagen, Schaltkammern und Freileitungsisolatoren gegeben.

Im Tonerdeporzellan ist der preiswerte Quarz SiO_2 durch den teureren Rohstoff Tonerde (Al_2O_3) ersetzt.

Lithiumporzellan (ALPHASTEAL®)

Die Verwendung von Lithium an Stelle von anderen Alkalien im Versatz führt zur Bildung von Spodumen in der gebrannten Keramik. Dieses Mineral hat wegen seines besonderen Kristallgitters eine äußerst geringe Wärmedehnung. Lithiumporzellan wird deshalb dort eingesetzt, wo ein elektrischer Isolator höchsten Thermoschockbeanspruchungen ausgesetzt ist. Die niedrige Längenänderung bei Erwärmung wird in der Meßtechnik zum Aufbau thermisch stabiler Strukturen verwendet. Seine spezifische Dichte ist erheblich geringer als die von Quarzporzellan. Die Wärmeleitfähigkeit ist so gering, daß dieser Werkstoff auch als thermischer Isolator verwendet wird.

Steatit (FREQUENTA®)

Der Steatit wird aus natürlichen Rohstoffen hergestellt, gehört aber nicht zu den tonkeramischen Werkstoffen; er konkurriert mit den Porzellanen als Isolierwerkstoff. Die Steatite werden

zwischen 1300 und 1400°C dicht gebrannt. Hierbei entstehen Magnesiumsilikatkristalle, die in einer Glasphase eingebettet sind. Heute wird fast ausschließlich Sondersteatit eingesetzt, der sich durch hervorragende Hochfrequenzeigenschaften auszeichnet. Er unterscheidet sich vom Porzellan durch seine höhere mechanische Festigkeit, einen niedrigeren dielektrischen Verlustfaktor und einen linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der eine Verbindung mit Metallen erleichtert. Gegenüber den Tonerdeporzellanen weist Steatit eine höhere Reiß- und Schlagzähigkeit auf, was sich vorteilhaft bei den klassischen Metall- Keramikfügungen auswirkt.

Typische Anwendungen sind Reglergehäuse, Isolierperlen und NH- Sicherungen

Cordierit (SIPA[®], SIKOR[®])

Cordieritwerkstoffe sind Magnesiumaluminiumsilikate, die beim Sintern von Speckstein mit Zusätzen von Ton, Kaolin, Korund und/ Mullit entstehen.

Cordierite haben eine niedrige Wärmeausdehnung. Daraus resultiert die hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit bei hoher mechanischer Festigkeit. Unterschieden wird zwischen porösem und dichtem Cordierit. Die porösen Varianten haben zwar etwas niedrigere Biegefestigkeiten, dafür aber gegenüber dem dichten Cordierit eine höhere Temperaturwechselbeständigkeit (da sich mechanische Spannungen in den Poren abbauen können). Cordierite werden besonders in der Elektrowärmetechnik und ganz allgemein in der Wärmetechnik eingesetzt. Anwendungsbeispiele sind Isolierkörper für elektrische Durchlauferhitzer, Heizleiterträger in den verschiedensten Öfen, Funkenkammerschutzplatten sowie Katalysatorträger.

Mullit (Pormullit, Dimullit, SIPALOX[®])

In den mullitischen Werkstoffen finden sich vor allem die beiden Minerale Mullit und Korund, von denen sich auch die Werkstoffigenschaften herleiten. Reine, dicht gesinterte Mullitkeramiken zeichnen sich durch hohe Festigkeiten und vergleichsweise geringe Wärmedehnung aus, was unmittelbar mit einer sehr hohen Temperaturwechselbeständigkeit verknüpft ist. Je nach Gefügebau und Phasenanteilen können aus diesem System auch Bauteile mit sehr hoher Festigkeit und Hochtemperaturkriechbeständigkeit erzeugt werden.

Thermoelementschutzrohre, Aufnahmen in Öfen und Flammenkühl- und Leitelemente sind bekannte Anwendungen dieser Keramiken. Eine besondere Variante wird für Tragrollen in Hochtemperaturöfen verwendet.

Allgemeine Bemerkungen

Die Silikatkeramiken heben sich von den Oxid- und Nichtoxidkeramiken besonders durch ihre niedrige Wärmeleitfähigkeit, niedrige Permittivitätszahl und einen geringen dielektrischen Verlustfaktor ab.

Genauere und ausführliche Informationen finden Sie auf den Folien

- Technische Kenngrößen im Vergleich
- Wärmeleitfähigkeit im Vergleich
- Thermische Ausdehnung im Vergleich
- Elastizitätsmodul im Vergleich
- Dichte im Vergleich
- Härte im Vergleich

zu den Werkstoffkennwerten finden sie im Internet unter www.CeramTec.de.



Kompetenz in Technischer Keramik Eigenschaften

Alkali - Aluminiumsilikate (C 100)

Bezeichnung nach IEC 672			C 110	C 111	C 112	C 120	C 130	Alphastea
elektrisch	Symbol	Einheit	Quarzporzellan	Tonerdeporzellan	Cristobalitporzellane	Tonerdeporzellan	Tonerdeporzellan	Lithiumporzellan
			plastische Formgebung	gepreßt			hochfest	
Durchschlagsfestigkeit	E_d	[kVmm ⁻¹]	20	—	20	20	20	15
Stehspannung, min.	U	[kV]	30	—	30	30	30	20
Permittivitätszahl, 48 bis 62 Hz	Σ_r	[—]	6 – 7	—	5 – 6	6 – 7	6 – 7,5	5 – 7
Verlustfaktor, bei 20 °C, 48 - 62 Hz	$\tan \delta_{pr}$	[10 ⁻³]	25	—	25	25	30	10
Verlustfaktor, bei 20 °C, 1 MHz	$\tan \delta_{HM}$	[10 ⁻³]	12	—	12	12	15	10
Spezifischer Widerstand bei 20 °C	ρ_{V-20}	[Wm]	10 ¹¹	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹¹	10 ¹¹	10 ¹¹
Spezifischer Widerstand bei 600 °C	ρ_{V-600}	[Wm]	10 ²	10 ²	10 ²	10 ²	10 ²	10 ²

Bild 3



Kompetenz in **Technischer Keramik** Eigenschaften

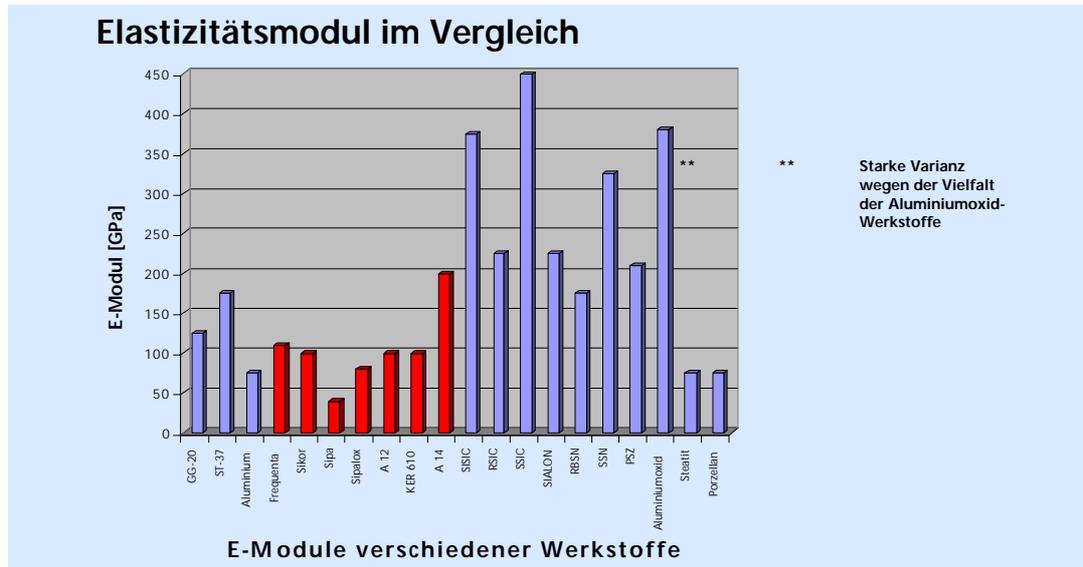


Bild 4



Kompetenz in **Technischer Keramik** Eigenschaften

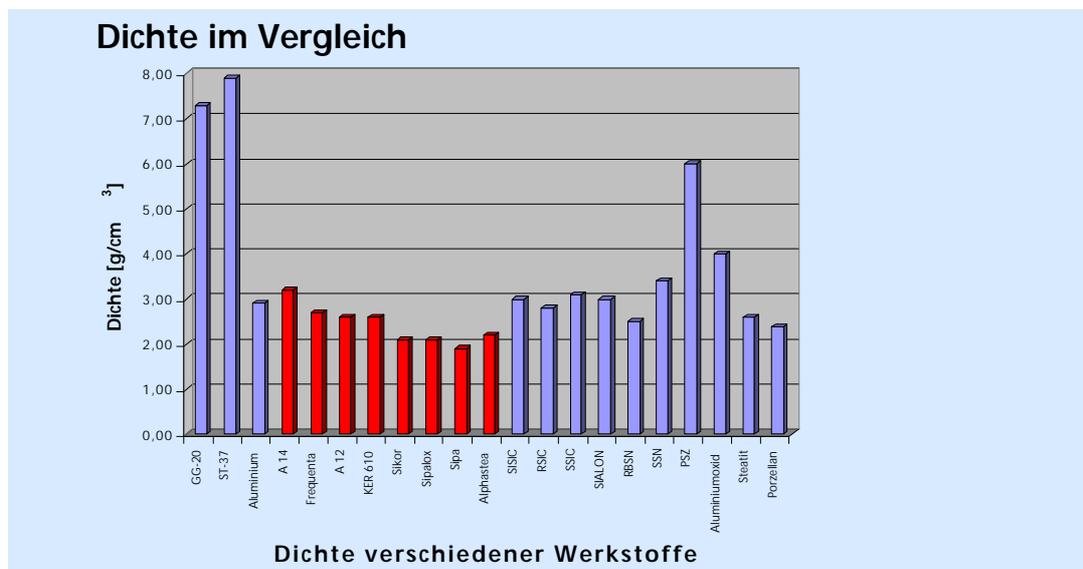


Bild 5



Kompetenz in **Technischer Keramik** Eigenschaften

Sonstige

Bruchzähigkeit	⇒	Deutlich niedriger als bei Metallen, daher schlagempfindlicher – jedoch formstabiler, auch bei hohen Temperaturen
mechanische/ thermische Beaufschlagung	⇒	keine duktilen Deformationen wie bei Metallen, plötzliches Versagen bei Erreichung kritischer Werte (Spröbruchverhalten)
Porosität	⇒	i.d.R. keine offene Porosität, gasdicht. Sonderwerkstoffe mit erwünschter Porosität zur Beherrschung thermischer Belastungen oder Vergrößerung der Oberfläche
TWB	⇒	i.d.R. gut, bis zu 700K. Abhängig vom keramischen Werkstoff sowie von Bauteilform und Größe

Bild 6



Kompetenz in **Technischer Keramik** Eigenschaften

Härte im Vergleich

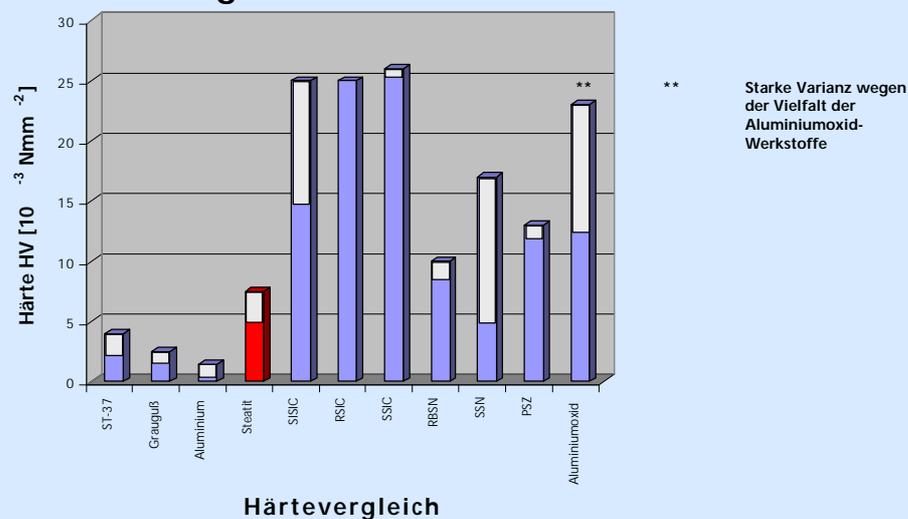


Bild 7



Kompetenz in Technischer Keramik Eigenschaften

Sonstige

Hochtemperaturfestigkeit	⇒ Sehr gut – hervorragende Eignung. Je nach keramischem Werkstoff bis zu ca. 1800 °C
Korrosionsbeständigkeit	⇒ hervorragende Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien (Ausn. Flußsäure)
elektrischer Widerstand	⇒ sehr hoch, i.d.R. bei $10^{11} \Omega m$, verbunden mit einer Durchschlagsfestigkeit $>10kVmin^{-1}$, z.T. auch bei hohen Temperaturen (Ausn. Halbleiter: z.B.SiC)
elektrische Polarisierung	⇒ gering, Permittivitätszahl im allgemeinen $6 < \epsilon_r < 12$
dielektrische Verluste	⇒ gering, zunehmend bei höheren Temperaturen und niedrigen Frequenzen (höhere Verlustfaktoren jedoch herstellbar)

Bild 8

Kostenvorteile und Nutzen der Silicatkeramik

Die Kostenvorteile von Silicatkeramik setzen sich nicht nur durch günstige Rohstoffe, sondern auch durch die Summe aller Einsparungen bei jedem Prozessschritt zusammen.



Know-how in Technologie

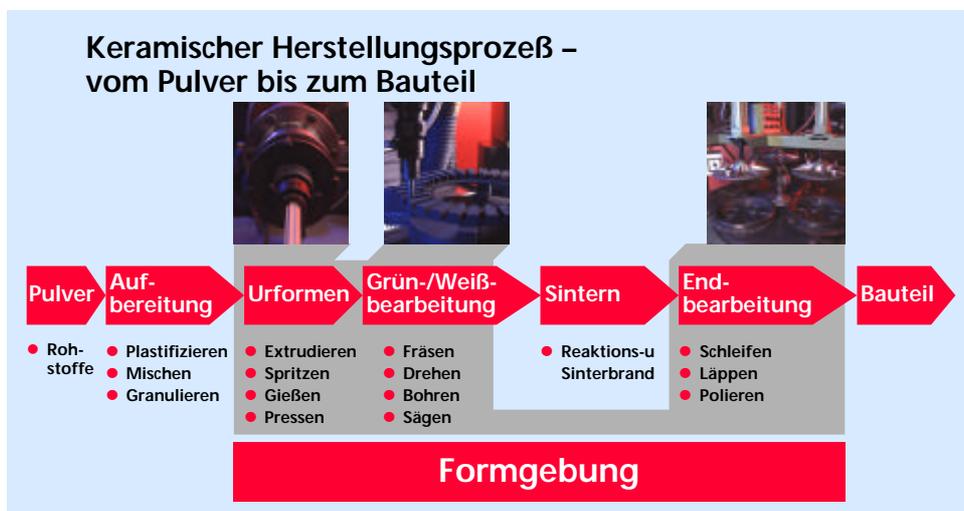


Bild 9



Know-how in Technologie

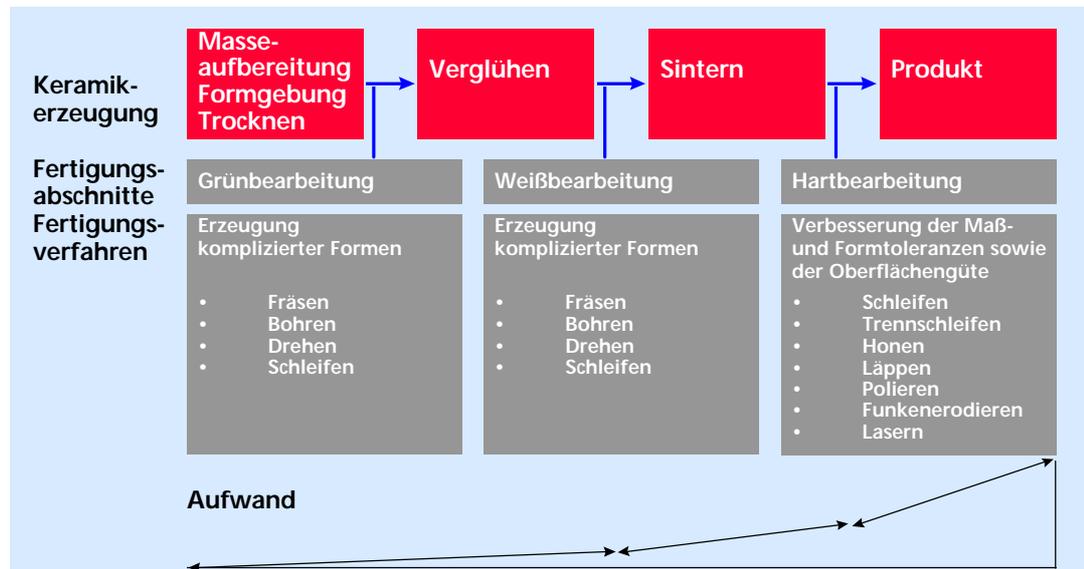


Bild 10

Rohstoffe

Die natürliche Rohstoffbasis der Silikatkeramiken liefert bereits einen wesentlichen Beitrag für die Wirtschaftlichkeit der Silikatkeramiken. Die Pulver sind heute perfekt konfektioniert und charakterisiert wie die teuren synthetischen Pulver. Vergleicht man die Kosten von silikatkeramischen Rohstoffen mit Oxid- und Nichtoxidrohstoffen ergibt sich ein Verhältnis von ungefähr eins zu zwei bis etwa dreitausend.

Aufbereitung

Bei der Masseaufbereitung wirkt sich die geringe Härte der Rohstoffe günstig auf die Lebensdauer der Maschinen und ihrer Auskleidungen aus. Außerdem läßt sich oft auf teure Plastifizierungs- und Stellmittel verzichten.

Formgebung

Die Werkzeuge unterliegen durch die geringe Härte der Rohstoffe nur einem geringen Verschleiß. Die Werkzeugstandzeit ist heute in Verbindung mit modernen Stählen für die Einhaltung enger Toleranzen über die Lebensdauer des Werkzeuges verantwortlich.

Durch die Schichtstruktur und die besonderen Eigenschaften der Minerale in den Rohstoffen lassen sich unter Verzicht auf die teuren Plastifizierungsmittel leicht Formen gießen und extrudieren.

Grün-/ Weißbearbeitung

Die geringe Abrasivität der Rohstoffe ermöglicht eine höhere Standzeit der eingesetzten Werkzeuge und eine wesentlich höhere Abtragsleistung bei der Bearbeitung als bei Grünkörpern aus synthetischen Rohstoffe.

Sintern

Sie Sintertemperaturen für die Silicatkeramik liegen je nach Werkstofftype zwischen knapp 1.000 und 1.450°C. Damit ergibt sich eine erhebliche Energieeinsparung beim Brand.



Know-how in Technologie

Sintern ⇒ **aus dem Rohstoff wird der Werkstoff (charakteristisches Gefüge)**

Brenntemperaturen	Werkstoff	Kompetenzen CeramTec
bei ca. 1250 °C	für Tonerdeporzellan	⇒ vielfältige Fertigungstechnologien, auf die jeweiligen Bauteile und Werkstoffe abgestimmt
bei ca. 1300 °C	für Steatit	⇒ modernste Sintertechnologien für Klein- und Großserien
bei ca. 1350 – 1400 °C	für Cordierit	⇒ Schnellbrandverfahren
bei ca. 1600 – 1800 °C	für Al ₂ O ₃	⇒ Sinterofen bis 2500 °C
bei ca. 2150 °C	für SiC	⇒ Sintern mit Druckunterstützung (bis 2000 bar)
bei ca. 2300 – 2500 °C	für RSiC allgemein: ⇒ Verfestigung ⇒ Verdichtung ⇒ Mikrogefüge	⇒ Know-how enge Toleranzen und Maßhaltigkeit (Präzisionsverfahren)



Bild 11

End- oder Hartbearbeitung

Generell sollte die Nachbearbeitung möglichst minimiert werden, weil die Keramiken nach dem Brand nur noch mit hohem Aufwand zu bearbeiten sind. Um gewisse Oberflächeneigenschaften zu erreichen, ist die Hartbearbeitung unumgänglich.



Abhängigkeit der Oberflächenqualität vom Bearbeitungsverfahren dargestellt am Beispiel von Aluminiumoxid

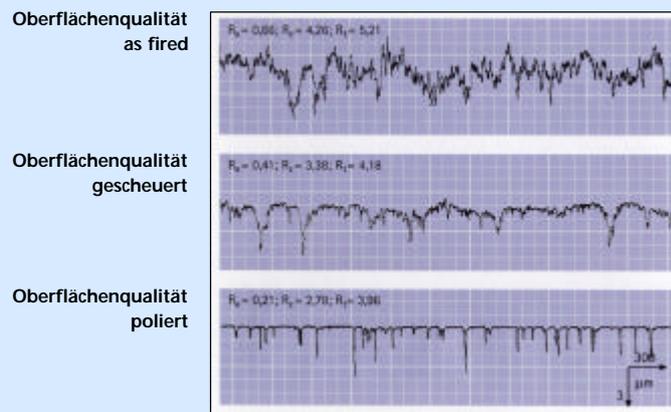


Bild 12

Die beim Brand entstandenen Minerale und die Glasphase weisen eine deutlich geringere Härte auf als die Oxid- und Nichtoxidkeramiken. Die Vorschubgeschwindigkeiten und die Abtragsleistung der Diamantwerkzeuge sind bei der Bearbeitung von Silikatkeramiken um Faktoren höher.

Besondere Verwendungsmöglichkeiten von Silicatkeramiken

Eine weitere Möglichkeit zur Kostensenkung und Nutzenoptimierung bieten spezielle Verbindungs- und Fügetechniken (Bilder 14 und 15). Diese sind in der Praxis vielfältig erprobt und bieten eine einmalige Chance für die Nutzung der keramischen Erfahrung des Keramiklieferanten.

Systemlösungen haben gleich mehrere ihnen immanente Kostensenkungspotentiale und Vorteile, die auf Bild 13 zusammengefasst sind.



Spezialist in **Systemlösungen** Verbindungs- und Füge-technik

Nutzen der Systemlösung

**Kosten-
mini-
mierung**
gezielter
Einsatz
von
Keramik
im
Funktions-
bereich

Verbesserung
des
Verhaltens
der
Funktions-
einheit

Optimierung
der
Beanspruch-
barkeit
des
Bauteils

Reduzierung
des
Aufwands
für
Qualitäts-
sicherung

**Einsparungs-
potentiale**
im System:
Einkauf
und
Herstellungs-
prozeß

**Risiko-
minimierung**
Verantwortung
für die
Funktion
des
Teilsystems
liegt beim
Lieferanten

Reduktion
der Anzahl
der
Lieferanten,
Konzentration
auf
**System-
lieferanten**

Bild 13

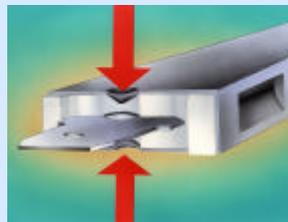


Spezialist in **Systemlösungen** Verbindungs- und Füge-technik

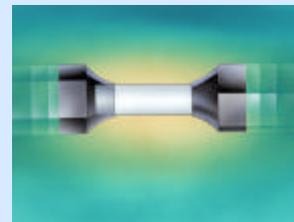
Beispiele aus der Praxis



Stauch-
keramischer
Lampensockel
mit
Kontaktfahne



Krimpen:
keramischer
Lampensockel
mit
Kontaktfahne



Umschrumpfen:
keramischer
Druckstift
mit
Metall-Gewinde

Bild 14

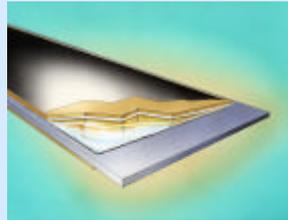


Spezialist in **Systemlösungen**
Verbindungs- und Fügetechnik

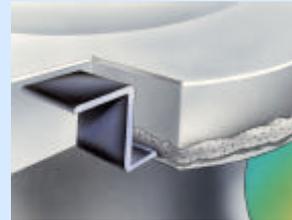
Beispiele aus der Praxis



Umbördeln:
keramische
Zündbrennerdüse
mit
Metall



**Kleben mit
Thermoplasten:**
keramische
Funkenkammerplatte
mit Glasfasergewebe
im Sandwich



Kitten: Kontaktblech

Bild 15