

2. Vom Werkstoff zum Bauteil

2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich

- Dr. Ilka Lenke
CeramTec GmbH
Plochingen

Die Folien finden Sie ab Seite 28.

2.1.1. Einleitung

Keramische Werkstoffe unterscheiden sich in Ihren mechanischen und physikalischen Eigenschaften deutlich von Metallen und Polymeren. Aber auch innerhalb der Werkstoffgruppe Keramik gibt es eine Vielfalt von unterschiedlichen Eigenschaftskombinationen. Je nach Anwendung gilt es, die richtige Wahl zu treffen. Der Vortrag gibt einen Überblick über die besonderen Eigenschaften der Keramik im Vergleich zu anderen Werkstoffen und über besondere Eigenschaften spezieller Keramiksorten. Diese werden anhand von Anwendungsbeispielen erläutert.

2.1.2. Silikatkeramik

Die Verwendung von Keramik als Haushalts- und Kunstgegenstand hat eine lange Tradition. Erste Nutzgefäße und Figuren aus Ton wurden bereits vor mehr als 15.000 Jahren hergestellt. Ungefähr 10.000 Jahre später wurden dann Ziegelsteine in Mesopotamien und Indien gefertigt. Mit der Entdeckung des elektrischen Stroms und den Erfindungen zur Nutzung des Stroms im 19. Jahrhundert begann die Entwicklung der Technischen Keramik. Interessant machten diesen Werkstoff die herausragenden isolierenden Eigenschaften insbesondere im Vergleich zu den metallischen Werkstoffen. Gegenüber Lösungen aus Kunststoffen zeichnete sich die Keramik durch ihre thermische Belastbarkeit aus. Die eher niedrigen Zähigkeiten und Festig-

keiten der Silikatkeramiken jedoch waren schnell ein Ansatzpunkt für die Entwicklung neuer und immer besserer Sorten, insbesondere für Anwendungen in denen die Komponenten auch mechanisch belastet werden. Für einen Großteil der Anwendungen im Bereich Isolation allerdings sind die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Silikatkeramiken ausreichend und so ist der Markt für die Keramik aus den natürlichen Rohstoffen genauso groß wie für Produkte aus Aluminiumoxid. Anwendungen sind Sicherungsbauteile, Katalysatorträger, Mahlkugeln und Futtersteine, Schmelztiegel, Abdampfschalen und Verdampferstäbchen, Sockel für die Licht- und Temperaturregeltechnik, Bauteile für Mess- und Hochpräzisionsmessung mit nahezu Nullausdehnung und für die thermische Isolation in der Heiztechnik.

2.1.3. Oxidkeramik

2.1.3.1. Aluminiumoxid

Aluminiumoxide haben ebenso gute elektrisch isolierende Eigenschaften wie die Silikatkeramiken, aber wesentlich besseren mechanischen Kennwerten. Einen Entwicklungsschub erfuhren die Aluminiumoxid-Sorten in den 80iger Jahren. Die Gefüge wurden feinkörniger (siehe Folie) und die Festigkeiten und Zuverlässigkeiten verbesserten sich. So werden heute sehr flache Platten aus Aluminiumoxid (< 1 mm), so genannte Substrate, in der Mikro- und Hochleistungselektronik eingesetzt. Diese Substrate werden mit elektronischen Leiterbahnen und Bauteilen bestückt und zum Beispiel in Airbag-Zündern verbaut. Eine neue Entwicklung im Bereich der Elektronik ist, Kühlkörper für LEDs aus Aluminiumoxid einzusetzen. Ein ganz anderer Anwendungsbereich für Aluminiumoxid ist der Verschleißschutz. Aufgrund der kovalent-ionischen Bindungsverhältnisse, lassen sich die Gitterbausteine kaum verschieben. Daraus resultiert eine hohe Härte beziehungsweise ein hoher Widerstand gegen das Eindringen von anderen Körpern. Hier ist die Keramik Metallen und Kunststoffen deutlich überlegen. Ein weiterer Vorteil, der aus den gegenüber Metallen und Kunststoffen anderen Bindungsverhältnisse resultiert, ist die gute chemische Beständigkeit und damit Korrosionsbeständigkeit. Auch sind Abriebpartikel aus Aluminiumoxid gesundheitlich unbedenklich, so dass zum Beispiel Dicht- und Regelscheiben problemlos

in Wasserhähnen und Pumpen eingesetzt werden können. Die Anwendungen im Verschleißschutz und in der Ballistik sind vielfältig und werden an anderer Stelle des Buches ausführlich beschrieben.

2.1.3.2. Zirkonoxid

Bevor Zirkonoxid als Werkstoff eingesetzt werden konnte, musste die Hürde der Gitterstrukturumwandlung in Abhängigkeit von der Temperatur überwunden werden. Beim Abkühlen reiner Zirkonoxide kommt es bei ca. 1.100°C zu einem Volumensprung von ca. 12% und somit zu einer Zermürbung des Werkstoffes. Werden aber Verbindungen wie Yttriumoxid oder Magnesiumoxid hinzu gegeben, kann dieser Volumensprung vermieden werden und man erhält einen oxidischen Werkstoff mit ganz besonderen Eigenschaften wie

- hoher Wärmedehnung
($\alpha=11 \times 10^{-6}/K$, ähnlich einigen Stahlsorten)
- sehr gute thermische Isolation
bzw. niedrige Wärmeleitfähigkeit
- sehr hoher Widerstand gegen die Ausbreitung von Rissen
bzw. hohe Risszähigkeit ($6,7 \text{ MPam}^{3/2}$)
- Fähigkeit zur Sauerstoffleitung (Eingesetzt bei der Messung von Sauerstoffpartialdrücken → Lambdasonde)

Preislich liegen Bauteile aus diesem Werkstoff aber deutlich über Bauteilen von Aluminiumoxid, da die Rohstoffe schon viel teurer sind. Eingesetzt werden Zirkonoxide zum Beispiel beim Ziehen von Drähten als so genannte Drahtziehkone zum Umlenken der Drähte zwischen den Ziehsteinen, als Werkzeug bei der Drahtumformung, in Stahl-Keramik-Verbundkonstruktion, als Isolierring gegen Hitze in einigen Bremsrädern, Bauteile für Schweißprozesse und als Material für Kronen und Brücken in der Dentalindustrie.

2.1.3.3. Mischoxide

Der Wunsch nach einem Werkstoff, der alle vorteilhaften Eigenschaften vereint, trieb die Entwicklung von Mischoxiden an. Mischungen von Aluminiumoxid und Zirkonoxid fungieren unter den Abkürzungen **ATZ** oder **ZTA** (Alumina Toughned Zirconia / Zirconia Toughned Alumina). Die Verstärkung des einen mit dem anderen Oxid wirkt sich zum Beispiel positiv auf die erzielbaren Festigkeitswerte auf. Es gibt ZTA-Werkstoffe, die Biegefestigkeiten von 1.350 MPa und Druckfestigkeiten von über 4.700 MPa erzielen. Angewandt werden solche Werkstoffe für Bauteile die höchst zuverlässig sein müssen wie die Hüftgelenkkugeln und –pfannen.

Ist eine gute Thermowechselbeständigkeit gefragt und können niedrige Festigkeitskennwerte akzeptiert werden, hier hat sich die Verbindung von Aluminium mit Titanoxid bewährt, die sogenannten Aluminiumtitanaten. Sie werden in Gießereien in Form von Steigrohren, Düsen und Verschlussystemen verwendet.

2.1.3.4. Piezokeramiken

Das besondere an Piezokeramiken, die in der Regel auf Blei-Zirkonat-Titanatverbindungen basieren, ist folgendes: bei mechanischem Druck entstehen elektrische Impulse bzw. umgekehrt, beim Anlegen einer elektrischen Spannung ändert sich die Abmessung des Werkstoffes. Dieser Effekt wird in vielen Anwendungen der Mess- und Regeltechnik verwendet. Der Markt für Produkte aus diesem Werkstoff nimmt derzeit stark zu. Es werden immer mehr Geräte zum vermessen, analysiert und für die Steuerungstechnik benötigt. Beispiele und eine genauere Erläuterung des Piezoeffektes werden folgen in dem entsprechenden Vortrag.

2.1.3.5. Andere Oxide

Es gibt noch viele andere Oxidkeramiken, die in ganz speziellen Nischen angewandt werden. Sie haben vom Marktvolumen eine untergeordnete Bedeutung, bei der Lösung von speziellen Problemen aber ein ganz besondere. Genannt seien hier Magnesiumoxid, Titanoxid, Uranoxid und Ferrite.

2.1.4. Nichtoxidkeramiken (Karbide und Nitride allgemein)

Die besonderen Eigenschaften der überwiegend kovalent gebundenen Karbide und Nitride waren schon lange bekannt, bevor es gelang, die Prozesstechnik so weit zu optimieren, dass größere Bauteile für den Einsatz in industriellen Anwendungen hergestellt werden konnten. Einen besonderen Antrieb erfuh die Entwicklung durch die Ölkrisen in den 70iger Jahren. Es wurden Werkstoffe gesucht, die in hohen Temperaturbereichen eingesetzt werden können, um thermische Prozesse effizienter zu führen. Themen wie die Entwicklung von Gasturbinen, Raumfahrtprojekte und der Wunsch nach dem adiabaten Motor trieben die Erforschung dieser Werkstoffe außerdem an.

2.1.4.1. Siliziumkarbide

Leichtester aber auch härtester keramischer Werkstoff aus synthetischen Rohstoffen mit einer sehr guten Wärmeleitfähigkeit sowie sehr guter Säure- und Laugenbeständigkeit ist das Siliziumkarbid. Außerdem bleiben die Werkstoffeigenschaften bis zu Temperaturen oberhalb 1.600°C konstant. Der hohe E-Modul von über 400 GPa sorgt für eine exzellente Formstabilität. Diese exzellenten Eigenschaften machen Siliziumkarbid sowohl für den Einsatz als Konstruktionswerkstoff im Bereich ballistischer Schutz als auch als Dichtungs- und Pumpenkomponente oder Düse in Chemieanlagen interessant. Siliziumkarbid hat aber noch weitere besondere Eigenschaften. Es kann als Halbleiter fungieren oder auch Licht emittieren und wird in der Elektroindustrie eingesetzt. Klassisch ist der Einsatz von SiC als Abrasivstoff und im Bereich der Feuerfestindustrie.

2.1.4.2. Siliziumnitride

Siliziumnitride weisen eine hervorragende Kombination von Werkstoffeigenschaften auf. Sie sind fast so leicht wie SiC, haben aber aufgrund ihrer Gefügestruktur eine sehr gute Thermowechselbeständigkeit und sind schlagend beanspruchbar, was sie der sehr hohen Bruchzähigkeit verdanken ($K_{IC} \geq 7 \text{ MPam}^{1/2}$). Die Gefügestruktur besteht aus stängelförmigen Kristallen, die sich als Mikrostäbchen verzahnen. Eine Anwendung bei der sich diese Eigenschaftskombination

besonders bewährt Zerspanung von Grauguss oder Gusseisen mit keramischen Wendschneidplatten. Im Unterschied zu Hartmetallen oder anderen Schneidstoffen, können beim Einsatz von keramischen Wendschneidplatten die Prozesse mit höchster Geschwindigkeit und kühl-schmiermittelfrei durchgeführt werden. Die Kombination von guten tribologischen Eigenschaften und sehr guter Bruchzähigkeit prädestiniert Siliziumnitride auch für die Anwendungen als Kugel- und Wälzkörper für leichte und hoch präzise Lager. Die gute Thermoschockbeständigkeit hingegen wird in Schweißprozessen genutzt.

2.1.4.3. Aluminiumnitrid

Aluminiumnitrid ist ein guter elektrischer Isolator mit dem Plus der sehr guten Wärmeleitfähigkeit von bis zu 220 W/mK. Eine Eigenschaftskombination, wie sie kein anderer keramischer Werkstoff (außer Diamant) aufweist. Bekannt war dies schon lange bevor die Entwicklung von Bauteilen Ende der 70iger Jahre wirklich begann. Bis dahin war es nicht gelungen, das wasserempfindliche Pulver in solch einer Qualität aufzubereiten, dass daraus richtige, einsatzfähige Bauteile gefertigt werden könnten. Getrieben wurde die Lösung des Problems dann durch die Weiterentwicklungen in der Hochleistungselektrik. Hohe Spannungen, größer 1.000 Volt (heute sogar 10.000 Volt), und Ströme von über 1.000 Ampère benötigen Substrate, die nicht nur gute isolierende Eigenschaften aufweisen müssen, sondern auch die entstehende Wärme gut abführen können. Erste Substrate, die dann im Serienmaßstab produziert wurden, kamen Ende der 80iger Jahre auf den Markt. Der nächste Schritt war die Verbesserung der Wasserempfindlichkeit durch die Modifizierung der Oberfläche. Eine dünne Schicht aus Aluminiumoxid schützt das darunter liegende Aluminiumnitrid vor Angriffen. So können Kühldosen heute problemlos auch mit Wasser in Kontakt gebracht werden. Eingesetzt werden Bauteile aus Aluminiumnitrid zum Beispiel in der Elektronik zum Antrieb von Kränen oder Hochleistungsmotoren sowie zur Wärmeableitung von leuchtenden LEDs.

2.1.5. Zusammenfassung

Die Werkstoffe der technischen Keramik werden in die Gruppen Silikatkeramik, Oxidkeramik und Nichtoxidkeramik unterteilt. Die Folie „Keramische Werkstoffe in der Technik“ gibt eine Übersicht über die jeweiligen Untersorten. Auf der Folie „Eigenschaften im Vergleich“ sind die Tendenzen in Bezug auf die Werkstoffkennwerte dargestellt. Ganz besondere Stärken der Keramik im Vergleich zum Metallen und Kunststoffen liegen im Bereich Verschleißschutz, Gewichtsreduzierung, Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit.

Die Anzahl der Sorten ist sehr groß und auch innerhalb einer Werkstoffgruppe kann es deutliche Unterschiede bei den mechanischen und physikalischen Eigenschaften geben, wie es die Werkstoffspinne skizziert. In den Zusatzfolien sind Werkstoffeigenschaften bezogen auf einzelne Eigenschaften auch im Vergleich zu Stahl und anderen Werkstoffen dargestellt.

Die keramischen Werkstoffe und Prozesse werden kontinuierlich weiter verbessert und die Zusammenhänge zwischen Gefüge und Eigenschaften immer besser verstanden. Auch neue Werkstoffe werden kreiert. Die heutigen Materialien sind nicht mehr mit denen vor zwanzig Jahren zu vergleichen. Ein wichtiger Trend derzeit ist die Steigerung der Zuverlässigkeit keramischer Sorten und der Einsatz im Bereich Lagertechnik und der thermische Prozessführung.

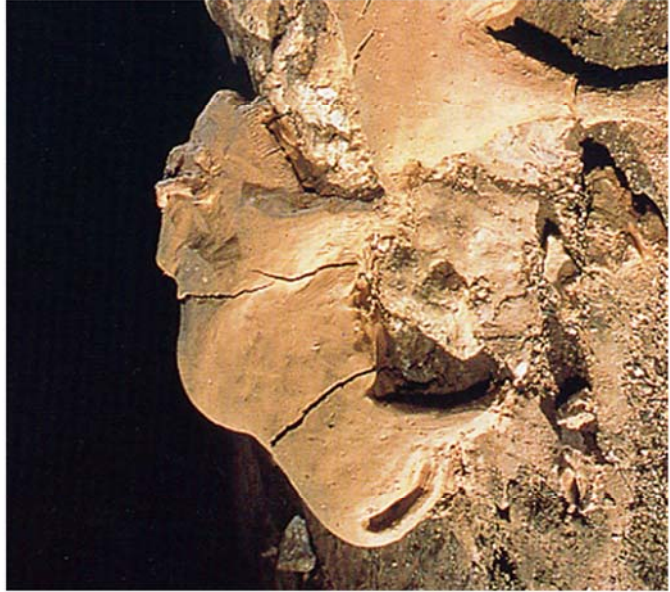
Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 22) finden sich auf den folgenden Seiten.

Keramische Werkstoffe im Vergleich

Dr.-Ing. Ilka Lenke
CeramTec GmbH
Plochingen



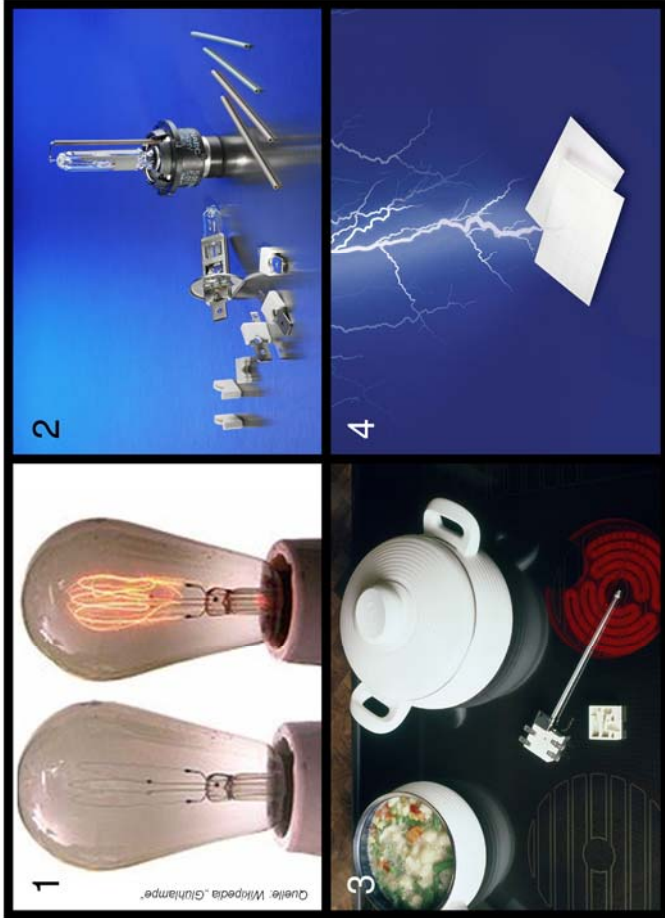
2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 1



Einleitung

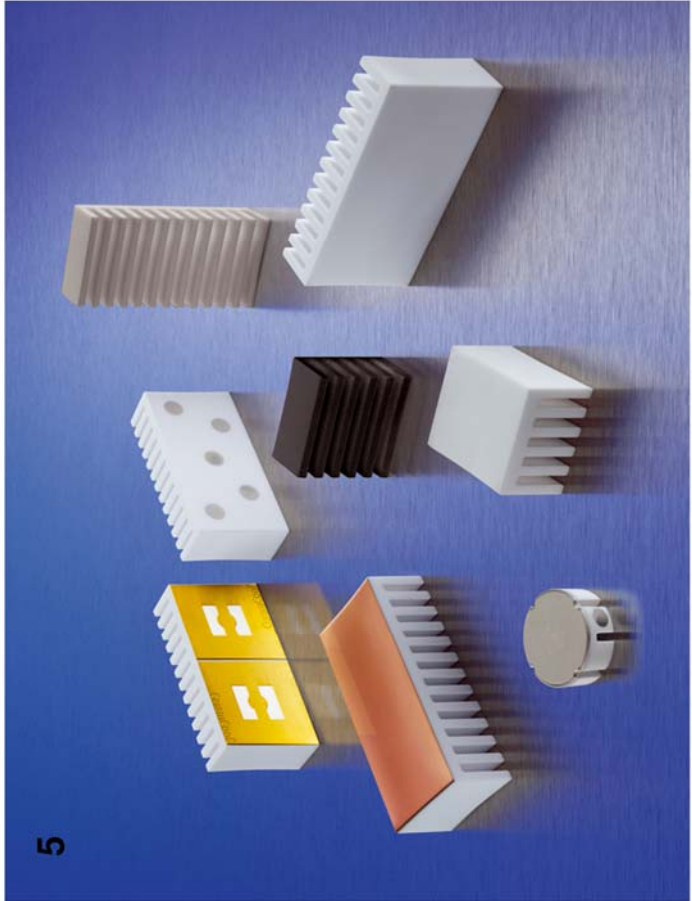
2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 2

Isolation mit Silikatkeramik & Aluminiumoxid



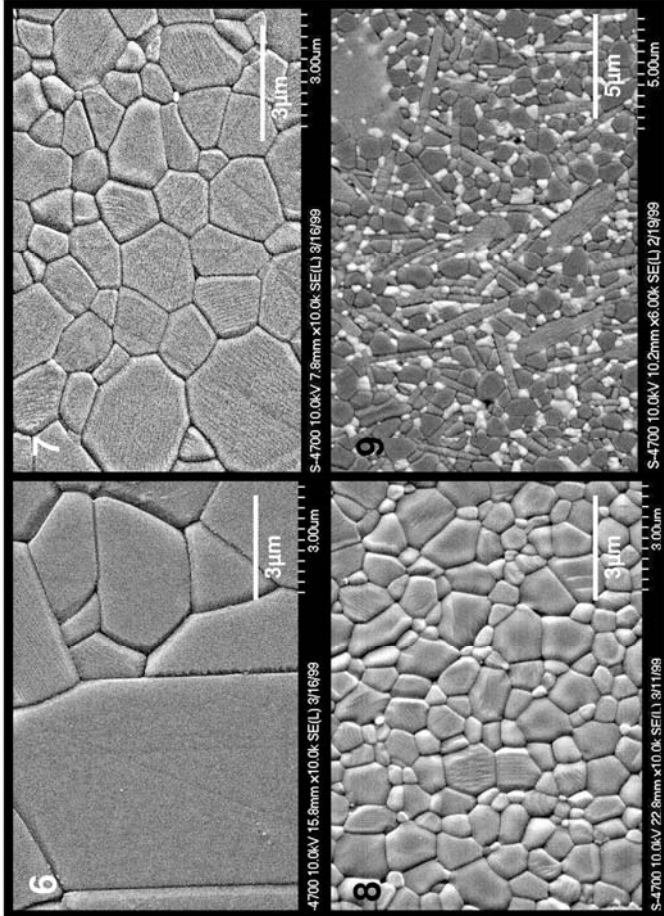
2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 3

Aluminiumoxid als Isolator und Kühlkörper



2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 4

Entwicklung Aluminiumoxidgefüge



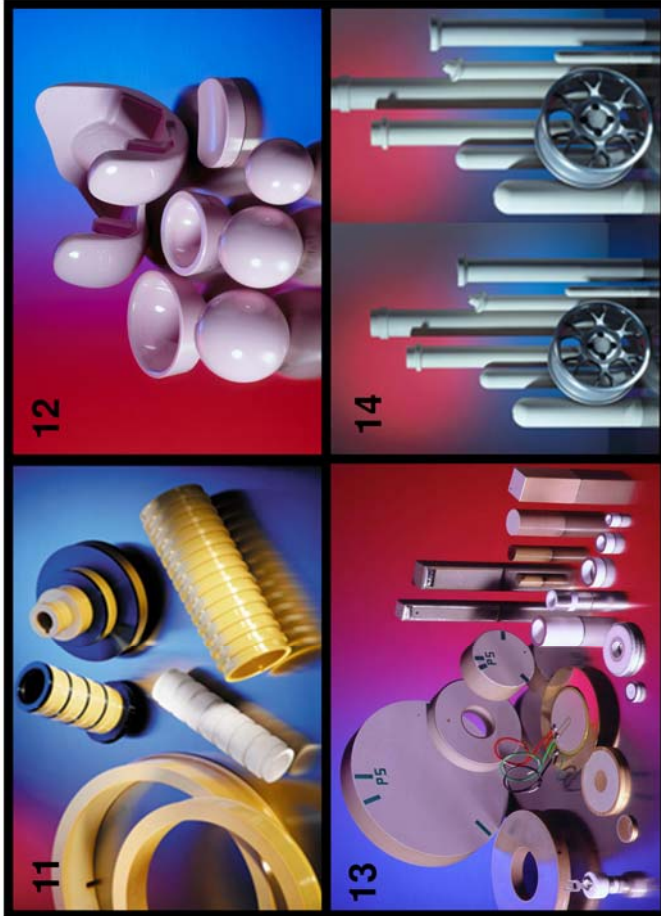
2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 5

Aluminiumoxid: Verschleiß- u. Korrosionsschutz



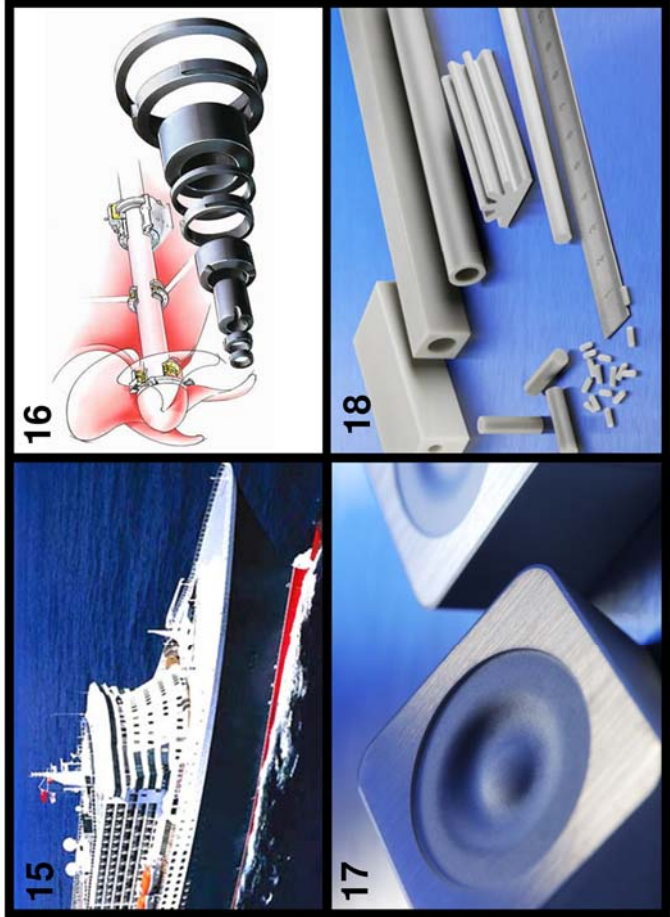
2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 6

Oxide als Konstruktions- und Funktionswerkstoff



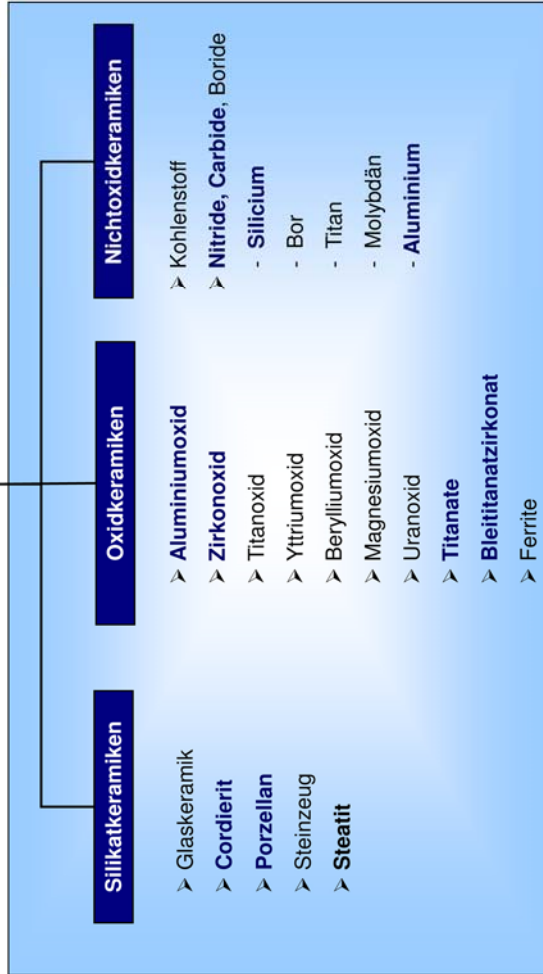
2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 7

Nichtoxidkeramik: Siliziumkarbide- & Nitride



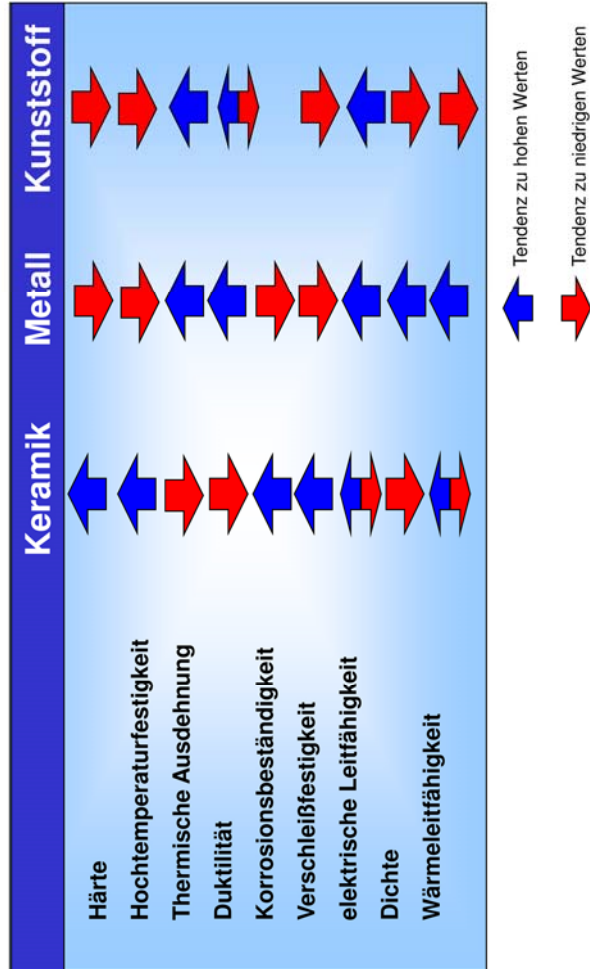
Keramische Werkstoffe & Eigenschaften

Keramische Werkstoffe in der Technik



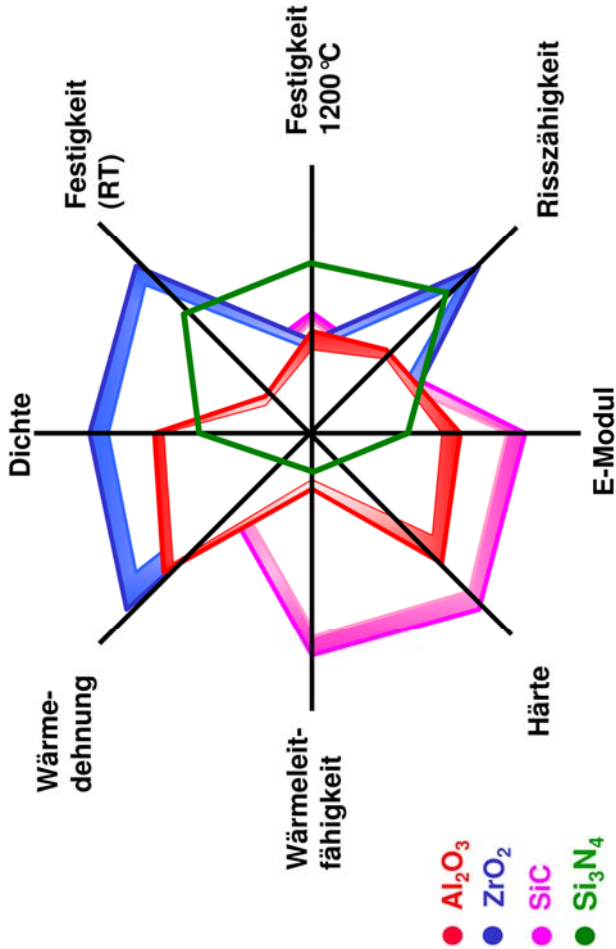
2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 9

Eigenschaften im Vergleich



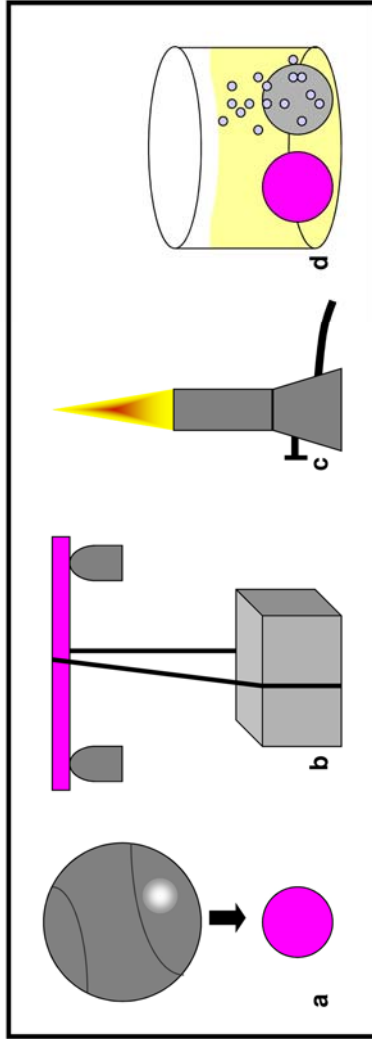
2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 10

Werkstoffspinne: Werkstoffe & Eigenschaften



2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 11

Film: Werkstoffeigenschaften im Vergleich



a) Falltest: Härte und Schlagunempfindlichkeit der Keramik, **b) Belastungstest:** Steif und duktil, **c) Temperaturtest:** Wärmeleitung und Temperaturstabilität, **d) Korrosionstest:** Chemische Stabilität

Keramische Werkstoffe & Eigenschaften



Schwächen von Metall
oder Kunststoff, weil...

Lösung mit Keramik,
weil...

verschleißanfällig

verschleißbeständig

geringere
Temperaturbeständigkeit

hohe
Temperaturbeständigkeit

korrosionsanfällig

korrosionsbeständig

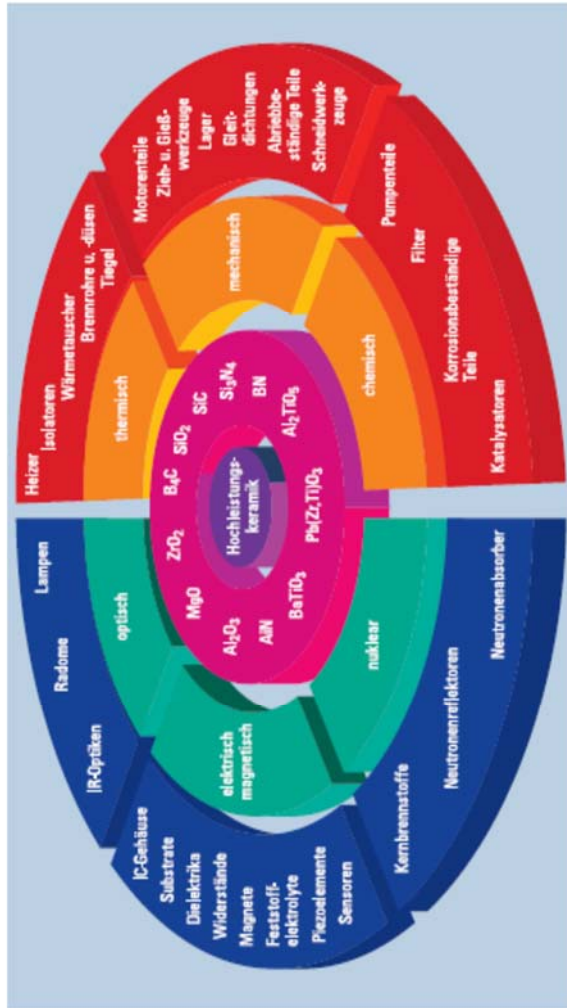
höheres Gewicht z.B. Stahl

leichter Werkstoff

Zusatzfolien

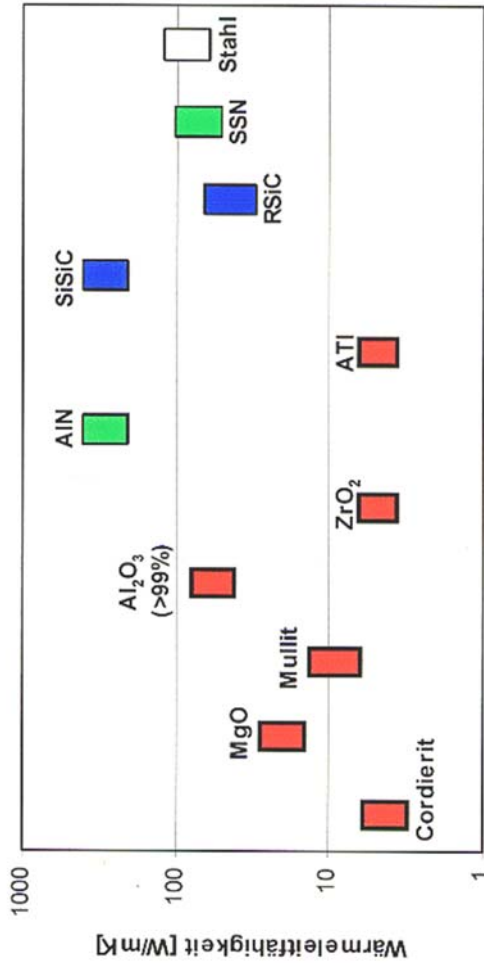
2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 15

Keramiken & Eigenschaften & Anwendungen



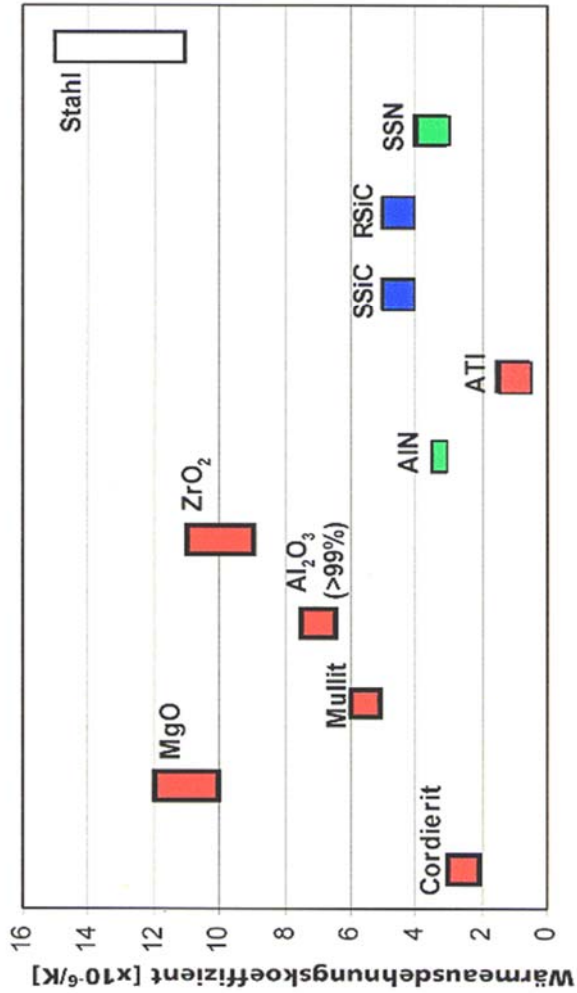
2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 16

Eigenschaft Wärmeleitfähigkeit

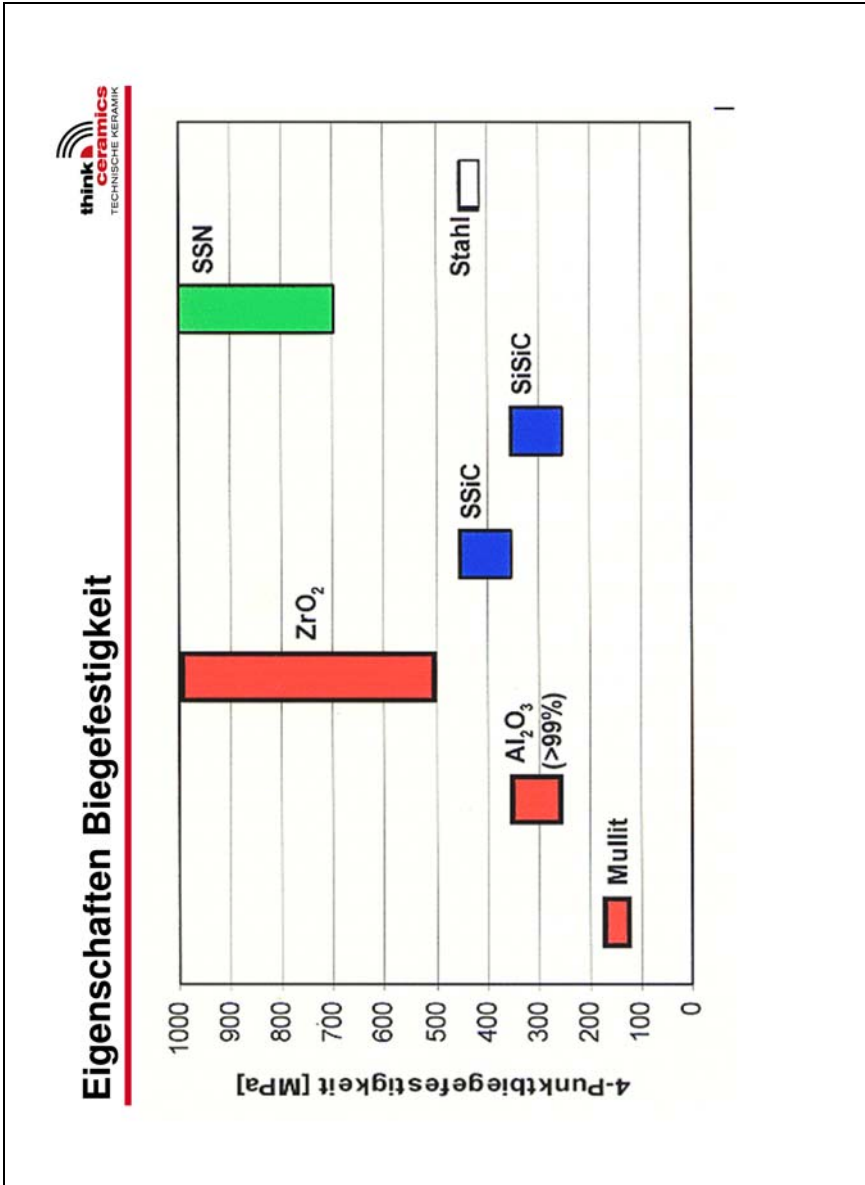


2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 17

Eigenschaft Wärmeausdehnung



2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 18

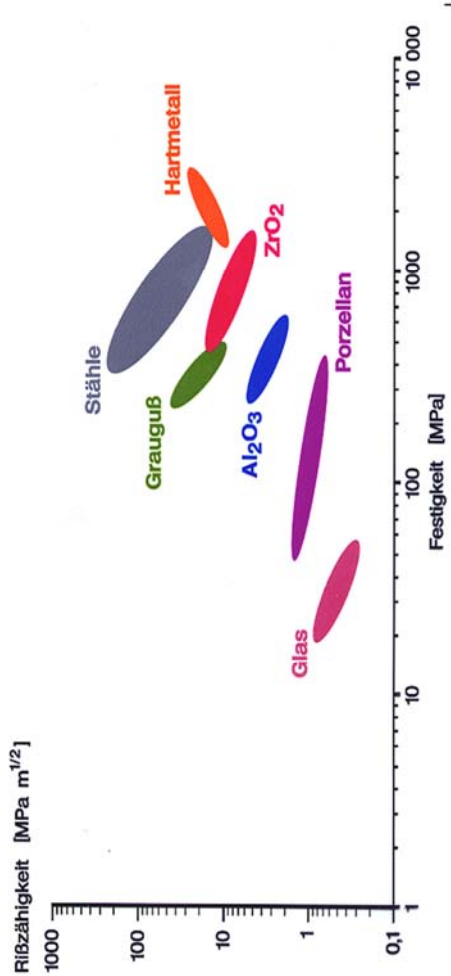


2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 19

Eigenschaft: Risszähigkeit & Festigkeit

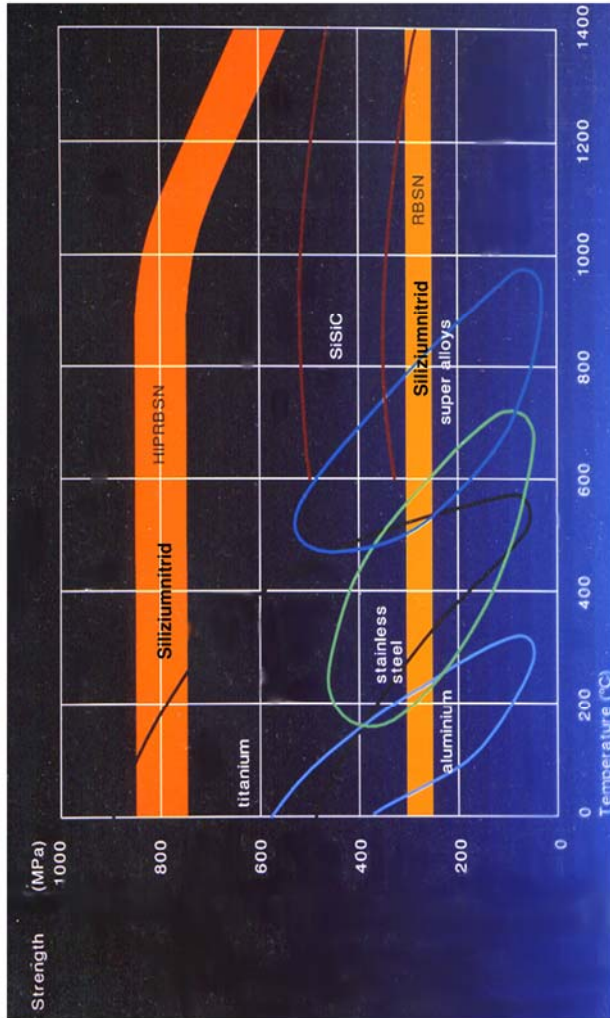
BASF

Pulverspritzguß
Werkstoffklassen
Mechanische Eigenschaften



2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 20

Eigenschaft: Temperaturstabilität



2.1 Keramische Werkstoffe im Vergleich - Folie 21

Keramische Werkstoffe & Eigenschaften

- Bild 1:** Glühlampe mit keramischen Sockel: Quelle Wikipedia „Glühlampe“
- Bild 2:** Sockel, Röhren aus Silikatkeramik zur elektrischen und thermischen Isolation. Bild: CeramTec GmbH / Multifunktionskeramik
- Bild 3:** Sockel als Träger für Bimetalle als Schalter z.B. bei Kochplatten, Wasserkocher, Bügeleisen. Bild: CeramTec GmbH / Multifunktionskeramik
- Bild 4:** Substrate für die Hochleistungselektronik zum Applizieren von elektronischen Schaltkreisen. Bild: CeramTec GmbH / Elektronik
- Bild 5:** Metallisch beschichtete Kühlkörper aus Aluminiumoxid und Aluminiumnitrid z.B. zum Auflöten von LEDs. Bild CeramTec GmbH „CeramCool“®
- Bild 6:** Al₂O₃ hergestellt aus Feinpulver (vor 1980), Bild CeramTec GmbH / Dr. W. Burger
- Bild 7:** Al₂O₃ (seit 1994), Pulver hergestellt aus dem Alkoxid-Prozess. Bild CeramTec GmbH / Dr. W. Burger
- Bild 8:** Al₂O₃ (seit 1999) Pulver aus NH₄AlO₃(OH)₂. Bild CeramTec GmbH / Dr. W. Burger
- Bild 9:** Zirkonoxid und plättchenverstärktes Aluminiumoxid (ZPTA) (seit 1997). Bild CeramTec GmbH / Dr. W. Burger
- Bild 10:** Verschleiß- und Korrosionsschutz mit Aluminiumoxid, ausgekleidetes Stahlrohr. Bild: CeramTec-ETEC
- Bild 11:** Zirkonoxidkeramik für die Drahtindustrie und in Verbindung mit Stahl. Bild CeramTec GmbH / Maschinenteknik
- Bild 12:** Zirkonoxid verstärktes Aluminiumoxid als Hüftgelenkkugel- und Platte, sowie als Knieimplantat. Bild CeramTec GmbH / Medizintechnik
- Bild 13:** Piezokeramik als Aktor, Sensor und Schallgeber. Bild: CeramTec GmbH / Multifunktionskeramik
- Bild 14:** Aluminiumnitrate für die Gießereindustrie, z.B. als Steigrohr. Bild CeramTec GmbH / Chemietechnik
- Bild 15:** Queen Mary. Bild-Quelle unbekannt
- Bild 16:** Gleitlager aus Siliziumkarbid. Bild-Quelle unbekannt
- Bild 17:** Wendschneiplatte aus Siliziumnitrid. Bild CeramTec GmbH / Werkzeuge
- Bild 18:** Extrudiertes Aluminiumnitrid mit guter Wärmeleitfähigkeit und guter elektrischer Isolation. Bild CeramTec GmbH / Elektronik