

2.3 Auswahlkriterien für Keramik im Anlagenbau

- Heinz Albert
Cera System Verschleißschutz GmbH
Hermsdorf

Die Folien finden Sie ab Seite 112.

Inhalt:

- 2.3.1. Einleitung**
- 2.3.2. Ausgewählte Eigenschaften von Keramik**
 - 2.3.2.1. Porosität**
 - 2.3.2.2. Mechanische Festigkeit**
 - 2.3.2.3. Temperaturbeständigkeit**
 - 2.3.2.4. Korrosionsbeständigkeit**
 - 2.3.2.5. Härte und Verschleißfestigkeit**
 - 2.3.2.6. Wärmeausdehnung**
 - 2.3.2.7. Wärmeleitfähigkeit und -isoliervermögen**
 - 2.3.2.8. Elektrisches Isoliervermögen**
- 2.3.3. Auswahl – immer ein Kompromiss**

2.3.1. Einleitung

In einer Vielzahl von Anwendungen haben sich die verschiedensten keramischen Materialien bewährt. Es gibt jedoch noch viel mehr Anwendungen, die für die Keramiken noch erschlossen werden müssen und auch werden. Die heute verfügbaren Ingenieurkeramiken erreichen hohe Festigkeitswerte. Ihre Werte sind vergleichbar mit den Werten von Metallen und übertreffen in der Regel alle Polymere.

Moderne Ausrüstungen enthalten Bauteile aus verschiedensten Technischen Keramiken. Die am häufigsten eingesetzten sind Werkstoffe aus den Gruppen:

- Al_2O_3 Aluminiumoxid,
- ZrO_2 Zirkonoxid,
- SiC Siliciumcarbid und
- Si_3N_4 Siliciumnitrid.



Bild 1: Armaturenbauteile aus unterschiedlichen keramischen Werkstoffen

Auch wenn die keramischen Materialien in einigen Parametern, wie z.B. der Korrosions-, der Temperaturbeständigkeit und der Medienverträglichkeit als sehr universell gelten, sind doch genaue Analysen der Belastungen und Kenntnisse über die speziellen Eigenschaften der Keramiken nötig, um den jeweiligen Einsatzfall erfolgreich zu lösen. Dabei sind allgemein gültige Regeln schwierig, da unter einer Werkstoffbezeichnung eigentlich eine ganze Gruppe von Werkstoffen mit zum Teil erheblich unterschiedlichen Eigenschaften zu finden ist. Es ist deshalb ratsam und erforderlich, sich die Werkstoffdaten detailliert zu betrachten.

Trotzdem wird versucht, im Folgenden einige Anhaltspunkte für eine Grobauswahl der keramischen Materialien für Anwendungen im Anlagenbau darzustellen.

2. Ausgewählte Eigenschaften von Keramik

2.1. Porosität

Die meisten im Anlagenbau eingesetzten Keramiken sind dichte Materialien. Deshalb werden im weiteren vor allem die Eigenschaften gerade dieser Keramiken betrachtet, obwohl eine Reihe überragender Eigenschaften nur von porösen Werkstoffen erreicht werden. Höchstes thermisches Isoliervermögen z.B. haben nur poröse Keramiken. Zum Vergleich folgende Daten:

Werkstoffe	Leitfähigkeit in W/mK
SISIC	130
Stahl	18
ZrO ₂	2
Keramische Fasern	0,2
Wacker WDS (Bild2)	0,02

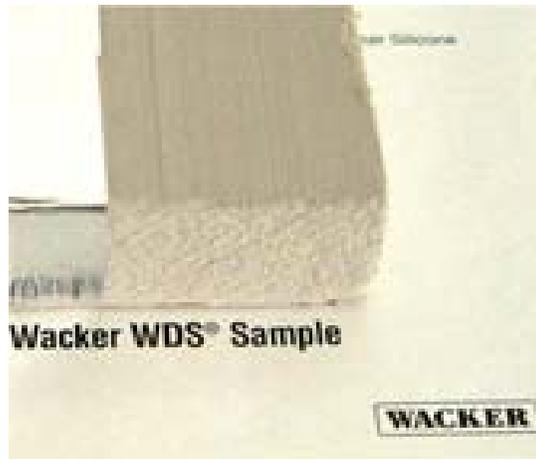


Bild 2: WACKER WDS

Die Thermoschockbeständigkeit – dazu später mehr – von dichten Keramiken in Form großformatiger Bauteile liegt bei maximal 500 K. Poröse Werkstoffe erreichen da weit mehr. Einer der interessantesten

Anwendungsfälle poröser Keramiken ist die Filterkeramik (Bild 3).
Ein z.Zt. ganz aktueller Einsatzfall von Filterkeramik ist die Reinigung
keramischer Abwässer.



Bild 3: Filterkerzen

2.2 Mechanische Festigkeit

Die meist gestellte und wichtigste Frage betrifft die mechanische Festigkeit.

Da die Druckfestigkeit der Ingenieurkeramik das 5- bis 10-fache der Biegefestigkeit beträgt, sind auf Druck belastete Teile meistens unproblematisch und geradezu zur Herstellung aus Keramik prädestiniert. Die Kugel und der Ausgangssitz eines Kugelhahnes (Bild 4) mit einer Kugel DN 150 hat z.B. im geschlossenen Zustand bei 34 bar 5,967 t auszuhalten.



Bild 4: Kugelhahn DN 250-150-250

Die Biegefestigkeit von bestimmten Ingenieurkeramiken, wie Siliciumnitrid und Zirkonoxid, ist bei Normalbedingungen vergleichbar mit Stählen und bleibt bei Temperaturen bis 1.000°C nahezu unverändert, wobei die Biegefestigkeit von Stählen je nach Legierung bereits ab 300°C abnimmt. Bei Temperaturen über 800°C sind die Keramiken in der Festigkeit praktisch konkurrenzlos.



Bild 5: Brennhilfsmittel aus SISIC zum Sintern von Sanitärporzellan

Die Bedeutung der Biegefestigkeit bzw. hier eine Kombination von Biege-, Torsions- und Zugfestigkeit wird an Kugelbrüchen (Bild 6) sehr deutlich.



Bild 6: Kugelbrüche an Kugeln DN 80, DN 50 und DN 25

Ein typisches und sehr bekanntes Beispiel für überwiegend Zugbelastung sind die Langstabisolatoren in Hochspannungsfreileitungen (Bild 7).



Bild 7: Langstäbe

Die Zugfestigkeit der Ingenieurkeramiken, die oft weniger als ein Drittel der Biegefestigkeit beträgt, und das Sprödbbruchverhalten der Keramiken erfordern das Vermeiden oder Minimieren von Zugspannungen bzw. eine möglichst genaue Berücksichtigung der Spannungsverteilung. Dies setzt voraus, dass die Bauteile entsprechend „keramikgerecht“ ausgelegt und konstruiert werden.

Kugeln, Kükten oder Kegel, die unvermeidlich auf Biegung beansprucht werden, sollten deshalb aus ZrO_2 oder Si_3N_4 gefertigt sein.

2.3. Temperaturbeständigkeit

Relativ einfach sind die Verhältnisse bei der maximal zulässigen Einsatztemperatur. Alle Ingenieurkeramiken sind bis $400^\circ C$ absolut problemlos, die meisten aber gar bis $800^\circ C$ bzw. $1.200^\circ C$ einsetzbar.



Bild 8: HT – Kugelhahn auf dem Prüfstand

Meistens bereiten nicht absolute Temperaturen Probleme sondern die Schockbeständigkeit. D.h. plötzliche Temperaturänderungen können zum Versagen führen. Hier ein Beispiel nicht beachteter bzw. nicht vermuteter Thermoschocks in einem Reaktor in einer Düngemittelvorstufe (Bild 9).

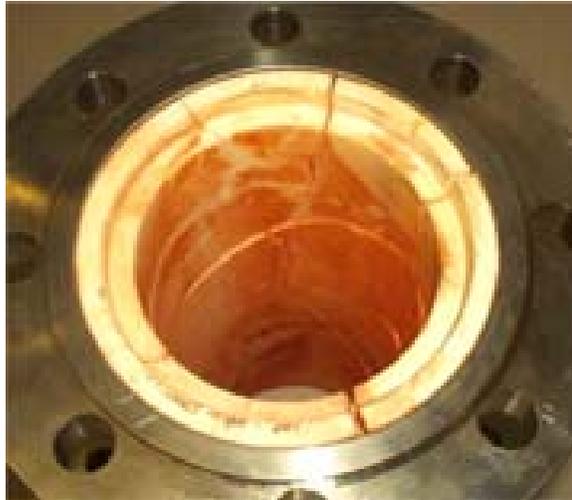


Bild 9: Reaktor mit Al_2O_3 -Auskleidung nach Thermoschockbelastung

Die Thermoschockbeständigkeit wiederum ist nicht nur von dem Werkstoff selbst, sondern dazu noch von der geometrischen Form, vom Herstellverfahren und vom Vorhandensein weiterer Belastungsarten abhängig.

Kugeln bzw. Küken für Hähne sind z.B. für folgenden Thermoschock einsetzbar aus:

Werkstoffe	Thermoschock
Aluminiumoxid	50 K
Zirkoniumoxid	250 K
Siliciumnitrid	350-500 K (Bild 10)



Bild 10: Armaturenbauteile aus Si_3N_4 für Hochtemperaturanwendungen

Für Hülsen oder Teile mit einfachen rohrähnlichen Geometrien und Wanddicken von 5 bis 10 mm können wesentlich höhere Thermoschocks zugelassen werden:

Werkstoffe	Thermoschock
Aluminiumoxid	120 K
Zirkoniumoxid	350 K
Siliciumcarbid (SISIC)	300 K
Siliciumcarbid (SSIC)	500 K
Siliciumnitrid	600 K

Die maximale Einsatztemperatur liegt dagegen für alle drei Werkstoffgruppen bei weit über 1.000 °C.



Bild 11: Bauteile aus Si_3N_4 in einem Kugelhahn für flüssiges Zink

2.4. Korrosionsbeständigkeit



Bild 12: Chemiekugelhahn

Ein ganz wichtiger Parameter ist die Korrosionsbeständigkeit. Die allgemein gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber aggressiven Medien macht technische Keramik unter anderem auch geeignet für den Einsatz im Chemieanlagenbau und in der Hochtemperaturtechnik. In einem Chemiekugelhahn (Bild 12) sind alle medienberührten Teile aus Keramik oder Dichtwerkstoff.

Wegen der Vielzahl der aggressiven Medien und der Menge sehr unterschiedlicher Keramiken gibt es keine Aufstellung über Medien und ihr Verhalten gegenüber Keramik. Hierzu sollte im konkreten Fall der jeweilige Hersteller angesprochen werden. Es empfiehlt sich, im Zweifels- oder Bedarfsfall entsprechende Versuche dem praktischen Einsatz voranzustellen und Konsultationen mit den Fachfirmen zu suchen. Besonders kritisch sind diese Angaben der Beständigkeit im Bereich höherer Temperaturen. Es muss auch immer davon ausgegangen werden, dass Beständigkeit gegenüber einzelnen Reagenzien nicht gleichzeitig bedeutet, dass die Beständigkeit gegenüber dem Gemisch der Reagenzien ebenfalls gegeben ist.

Als besonders kritische Bestandteile von aggressiven Medien sind Wasserdampf und Flußsäure zu betrachten. Die hydrothermale Beständigkeit von Y-stabilisiertem Zirkoniumoxid ist z.B. besonders schlecht, die von Karbiden und Nitriden kann bis 250°C/350°C als gut bezeichnet werden. Al_2O_3 ist in diesem Fall am besten geeignet.



Bild 13: Korrodierte Teile nach Einsatz im flußsäurehaltigen Medium

Bereits bei geringen Anteilen von Flußsäure versagen alle oxidischen Keramiken (Bild 13). Die beste Beständigkeit gegen Flußsäure haben unter den derzeit verfügbaren keramischen Materialien die Karbide.

2.5. Härte und Verschleißfestigkeit

Einer der wichtigsten Gründe für den Einsatz der Technischen Keramik z. B. in Armaturen (Bild 14) oder im Rohrverschleißschutz (Bild 15) ist deren Härte, die zu günstigem Verschleißwiderstand führt.



Bild 14: verschlissener Kegel aus Spezialstahl



Bild 15: defekter Rohrbogen aus Spezialstahl

Als Preis für die Härte besitzen keramische Werkstoffe kein plastisches Formänderungsvermögen (Duktilität) zum Abbau von Spannungsspitzen. Das Bauteil bricht ohne Vorankündigung.

2.6. Wärmeausdehnung

Wegen der überwiegend geringen Wärmeausdehnung der eingesetzten keramischen Materialien verändern die einzelnen keramischen Komponenten ihre Form und die Maße bei Einfluss von Temperatur kaum. Bei keramischen Armaturen wird deshalb die Dichtheit auch bei höheren Temperaturen kaum schlechter.



Bild 16: Keramikkugel mit Rundheit $2,4 \mu\text{m}$

Vor allem im Präzisions- und Messgerätebau wird die Formstabilität und die geringe Temperaturabhängigkeit von Ingenieurkeramik genutzt.

2.7. Wärmeleitfähigkeit und -isoliervermögen

Hier zeigen die verschiedenen Keramiken extrem unterschiedliche Werte. Die enorme Wärmeleitfähigkeit von Siliziumkarbiden, die oft höher liegt als bei Stahl wird zum Beispiel bei Wärmetauschern oder geschlossenen Brennern (Bild 17) ausgenutzt.

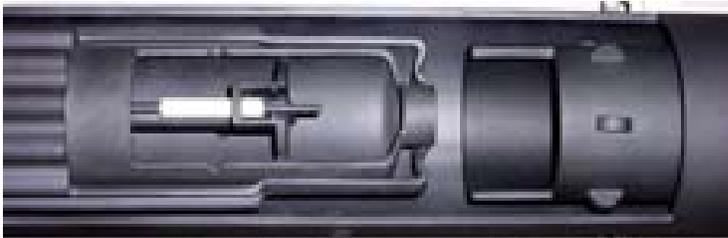


Bild 17: Schnitt eines Rekuperatorbrenners

Für beheizte Armaturen ist wichtig, dass die Heizenergie schnell auf das Medium übertragen werden kann. Deshalb kommen Karbide zum Einsatz.



Bild 18: Keramikarmatur mit elektrischer Heizmanschette

Bei Hochtemperaturanwendungen ist meistens eine gute Isolation nach außen notwendig. In diesen Fällen wird versucht, Keramik mit niedrigem Wärmeleitvermögen einzusetzen. (z.B. ZrO_2 hat nur etwa 10% der Wärmeleitfähigkeit von Stahl)

2.8. Elektrisches Isoliervermögen

Auch beim elektrischen Isoliervermögen zeigen die verschiedenen Keramiken unterschiedliches Verhalten. Allen bekannt dürften keramischen Isolatoren aus Porzellan für Hochspannungsanlagen sein.



Bild 18: Hochspannungsisolatoren bei der Prüfung

Im Niederspannungsbereich werden die Werkstoffe Porzellan, Steatit und Aluminiumoxid eingesetzt. Zu den Isolierwerkstoffen gehören auch Zirkoniumoxid und Siliciumnitrid. Siliciumcarbide sind keine Isolatoren.



Gaslanze mit Drallscheibe und Zünderlektrode

Bild 18: Brenner mit Elektrode

Der Gegenpol zur Zünderlektrode (Bild 18) wird von Gehäuse selbst übernommen

3. Auswahl – immer ein Kompromiss

Um in der Praxis die richtige Keramik auszuwählen, sind natürlich nicht nur die Eigenschaften, sondern auch die technische Machbarkeit und der Preis von großer Bedeutung. Dabei ist es schon bei den Eigenschaften „wie im richtigen Leben“. Es ist nie gleich alles beieinander. Man muss in jedem konkreten Fall alles gegeneinander abwägen und meistens einen Kompromiss schließen.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 14) finden sich auf den folgenden Seiten.

Einführung

Auswahlkriterien für Keramik im Anlagenbau

Heinz Albert
Cera System Verschleißschutz GmbH
Hemmsdorf





Keramikeigenschaften

Auswahlkriterien für Keramik im Anlagenbau

- Inhalt:**
- Einleitung
 - Eigenschaften von Keramiken
 - Porosität
 - Mechanische Festigkeit
 - Temperaturfestigkeit
 - Korrosionsbeständigkeit
 - Härte/Verschleißfestigkeit
 - Wärmeleitfähigkeit und -isoliervermögen
 - Wärmeausdehnung
 - Elektrisches Isoliervermögen
 - Auswahl - immer ein Kompromiß ?



Einleitung

Vielzahl von Anwendungen verschiedenster keramischer Materialien - bereits bewährt!

Noch viel mehr Anwendungen - müssen und werden noch erschlossen!

Am häufigsten eingesetzte Keramiken
= Werkstoffe aus den Gruppen:

- Al_2O_3 Aluminiumoxid,
- ZrO_2 Zirkonoxid,
- SiC Siliziumkarbid,
- Si_3N_4 Siliziumnitrid.



- Genaue Analyse der Belastungen
- Kenntnisse über spezielle Eigenschaften



Erfolg

Porosität

Im Anlagenbau überwiegend dichte Materialien !

Eine Reihe überragender Eigenschaften nur von porösen Werkstoffen:

- höchstes thermisches Isoliervermögen
- Thermoschockbeständigkeit
- Filterkeramik



Leitfähigkeit in W/mK für:

SiSiC	130
Stahl	18
ZrO ₂	2
Keramische Fasern	0,2
Wacker WDS	0,02

Filterkerzen zur Reinigung keramischer Abwässer

Mechanische Festigkeit 1

Druckfestigkeit = 5 - 10 x Biegefestigkeit

Druck belastete Teile = prädestiniert zur Herstellung aus Keramik

Beispiel Kugelbahn:

DN 150 34 bar

→ **5,967 t**



Biegefestigkeit:

- von Siliziumnitrid und Zirkondioxid bei Normalbedingungen vergleichbar mit Stahl
- nimmt bei Stahl über 300°C ab
- bei T > 800°C Keramik konkurrenzlos !

Mechanische Festigkeit 2



Kombination von

- Biegebelastung
- Torsionsbelastung
- Zugbelastung

Beispiel Kugelbrüche



Langstabilisatoren in Hochspannungsfreileitungen

Zugfestigkeit

oft weniger als 1/3 der Biegefestigkeit

- "keramigerech" konstruieren !
- Spannungsverteilung berücksichtigen !
- ZrO_2 oder Si_3N_4 verwenden !



Temperaturbeständigkeit

Zulässige Einsatztemperatur:

bis 400 °C

- problemlos alle Ingenieurkeramiken
- die meisten gar bis 800°C bzw. 1.200°C

HT -Kugelhahn auf dem Prüfstand



Bauteile aus Si_3N_4 in einem Kugelhahn für flüssiges Zink

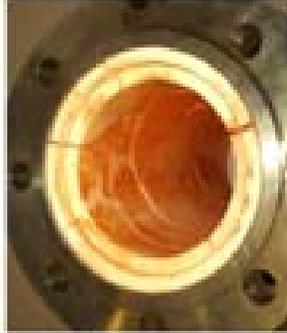
Problematischer ist die
Thermoschockbeständigkeit

Thermoschockbeständigkeit

Thermoschockbeständigkeit auch abhängig von:

- geometrischer Form
- Herstellverfahren
- weitere Belastungen

Reaktor mit Al₂O₃-Auskleidung
nach Thermoschockbelastung



Kugeln/Küken

Al ₂ O ₃	50 K
ZrO ₂	250 K
SiC	
SiSiC	
Si ₃ N ₄	350-500 K

Rohre

120 K
350 K
300 K
500 K
600 K

Armaturenbauteile aus Si₃N₄

Korrosionsbeständigkeit

Allgemein gute Korrosionsbeständigkeit

- trotzdem:
- Hersteller fragen !
 - im Zweifelsfall - Versuche !
 - Fachfirmen konsultieren !



Chemiekugelhahn - alle medienberührenden Teile aus Keramik
besonders Kritisch:

- Wasserdampf und Flußsäure

Al_2O_3 - hydrothermal gut beständig !

Karbide und Nitride bis 250°C/350°C beständig !

Gegen Flußsäure nur SSiC beständig !

Korrodierte Teile nach Einsatz im F-haltigem Medium



Härte und Verschleißfestigkeit

Härte und Verschleißfestigkeit =

wichtigste Gründe für Einsatz von Ingenieurkeramik
in Armaturen und Rohrverschleißschutz



Verschleißener Kegel aus
Spezialstahl

Als Preis für die Härte -

kein plastisches Formänderungsvermögen
(Duktilität)

Bauteil bricht ohne Vorankündigung !

Defekter Rohrbogen aus Edelstahl





Wärmeausdehnung

Überwiegend geringe Wärmeausdehnung !

- ↑ Keramische Komponenten ändern Form und Maße kaum
- ↑ Dichtheit keramischer Armaturen bei höheren Temperaturen kaum schlechter
- ↑ Präzisions- und Meißerätebau



Keramikkugeln mit
Rundheit 2,4 µm

Wärmeleitfähigkeit und -isoliervermögen

Verschiedene Keramiken - extrem unterschiedliche Werte !

- Karbid - enorme Wärmeleitfähigkeit
- mehrfach höher als bei Stahl



deshalb Einsatz in Wärmetauschern und Brennern

bei beheizten Armaturen - Heizenergie
muß schnell übertragen werden
⇒ Einsatz von Karbiden

bei HT-Anwendungen oft gute Isolation
gewünscht ⇒ Einsatz von ZrO_2
(Wärmeleitfähigkeit nur 1/9 von Stahl)





Elektrisches Isoliervermögen

Verschiedene Keramiken - extrem unterschiedliche Werte !

Isolierwerkstoffe

im Hoch- und Niederspannungsbereich:

- Porzellan, - Steatit, - Al_2O_3

auch ZrO_2 und Si_3N_4 gehören zu den Isolatoren



HS - Isolatoren bei der Prüfung



Gaslanze mit
Drallscheibe und
Zündelektrode

Siliziumkarbidwerkstoffe
leiten den Strom

Brenner mit Elektrode
Zündelektrode, Gegenpol = Gehäuse

Auswahl - immer ein Kompromiss

Welche Keramik ??

- Eigenschaften ?
- technische Machbarkeit ?
- Preis ?

Ist nie alles beieinander ??

Lassen Sie sich beraten !

Mit Keramik lösen Sie Ihr Problem !

Konkrete Werte ? ⇒ Brevier des VKI !

⇒ Hersteller fragen !

