

### 4.2. Hochtemperaturarmaturen

- Heinz Albert  
Cera System Verschleißschutz GmbH  
Hermsdorf

*Die Folien finden Sie ab Seite 410.*

#### **Inhalt:**

- 4.2.1 Einleitung
- 4.2.2 Korrosionsprobleme von Metallen
- 4.2.3 Nutzbare und zu beachtende Eigenschaften von Keramiken
  - 4.2.3.1 Mechanische Festigkeit
  - 4.2.3.2 Temperaturfestigkeit
  - 4.2.3.3 Thermoschockbeständigkeit
  - 4.2.3.4 Korrosionsbeständigkeit
  - 4.2.3.5 Wärmeleitfähigkeit und –isoliervermögen
- 4.2.4 Konstruktive Lösungen / Beispiele
  - 4.2.4.1 Armaturen bis 450 °C
  - 4.2.4.2 Armaturen bis 850 °C
  - 4.2.4.3 Armaturen bis 1.200 °C
  - 4.2.4.4 Armaturen über 1.200 °C

#### **4.2.1 Einleitung**

Wenn von Hochtemperatur die Rede ist, geht es um Dauereinsatztemperaturen von 180 bis weit über 1.200 °C. Bei diesen Verhältnissen scheiden Kunststoffe vollständig aus, viele Materialien liegen als



Hier soll es vor allem um die nutzbaren und zu beachtenden Charakteristiken der Keramiken im Hochtemperaturbereich gehen.

Die ausschlaggebenden Vorteile sind hier die überragende Temperaturfestigkeit und die ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit.

### 4.2.2 Korrosionsprobleme von Metallen

Zu dem ohnehin auch ohne Medieneinfluss auftretenden Festigkeitsabfall kommt bei Metallen durch Belastung mit bestimmten Stoffen eine Reihe von Korrosionsproblemen hinzu, die mit der Zeit zur Versprödung und zum absoluten Festigkeitsverlust führen können.

#### **Oxidation**

Die sicher noch harmloseste Erscheinung ist die Oxidation. Die Verbindung mit Sauerstoff, meist bei einfachem Stahl durch Verzunderung an der Oberfläche sichtbar, tritt bei Edelstählen bei Temperaturen oberhalb 1.000 °C auf.

#### **Aufkohlung**

Über die Zersetzung von Kohlenwasserstoffen bei höheren Anwendungstemperaturen unterliegen Stähle einem Angriff von C-Atomen. Es kommt zur Schmelzpunktniedrigung, zur Karbidbildung und somit zur Chromverarmung bzw. zur Duktilitätsreduzierung.

#### **Sulfidierung**

Im Kontakt mit Schwefel und Schwefelverbindungen, z. B. Schwefeldioxid und Schwefelwasserstoff werden Metallsulfide gebildet, die in der Regel zu schweren Werkstoffschädigungen führen. Die Ursache liegt in einem um den Faktor 2,5 – 2,9 größeren Volumen im Vergleich zu korrespondierenden Metalloxiden.

#### **Chlorierung**

Halogen und Halogenverbindungen, zumeist Chlor- und Fluorverbindungen, gelangen über die Gasphase oder Salzschnmelzen in Kontakt mit dem Werkstoff. Elementare Halogene greifen ebenso hitzebeständige Legierungen bereits bei mittleren Temperaturen sehr stark an.

#### **Nitrierung**

Das Werkstoffverhalten ist bei höheren Temperaturen in starkem Maße von der Legierungszusammensetzung abhängig. Niedriglegierte Stähle erfahren beispielsweise bei 350 - 500 °C in Ammoniak eine starke Aufstickung durch innere Nitrierung.

Bei Temperaturen ab ca. 550 °C sind hochchromhaltige Edelstähle aufgrund der hohen Stickstoffaffinität von Chrom besonders gefährdet. Durch die große Volumenzunahme, die mit der Bildung von Nitridschichten einhergeht, werden starke Spannungen aufgebaut, die zum schalenförmigen Abplatzen der Nitridschichten führen.

## **4.2.3 Nutzbare und zu beachtende Eigenschaften**

### **4.2.3.1 Mechanische Festigkeit**

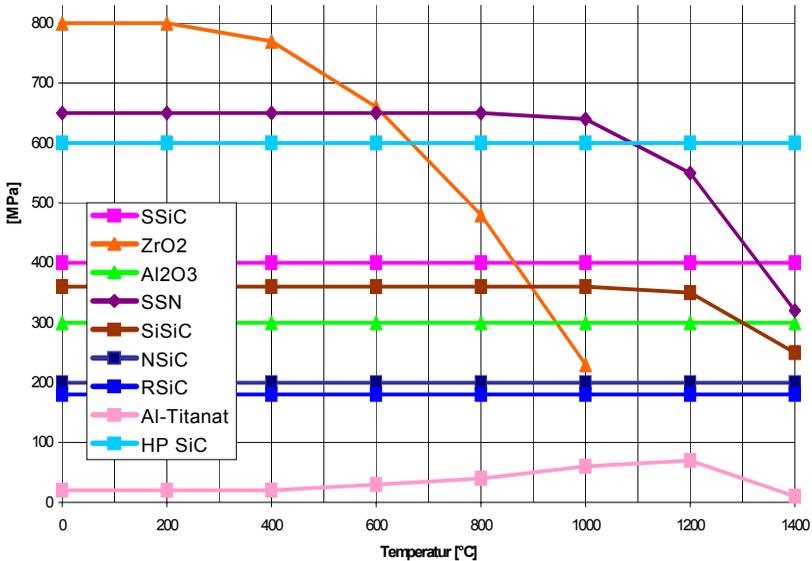
Die Frage nach der mechanischen Festigkeit ist meist die wichtigste Frage. Da die Druckfestigkeit der Ingenieurkeramiken das 5- bis 10fache der Biegefestigkeit beträgt, sind auf Druck belastete Teile meistens unproblematisch und geradezu zur Herstellung aus Keramik prädestiniert.

Die Kugel und der Ausgangssitz eines Kugelhahnes (Bild 2) mit einer Kugel DN 150 haben z. B. im geschlossenen Zustand bei 34 bar 6 t auszuhalten.



Bild 2: Kugelhahn DN 350-150-350

Die Biegefestigkeit von bestimmten Ingenieurkeramiken, wie Siliziumnitrid und Zirkoniumoxid, 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 (Grafik 1)

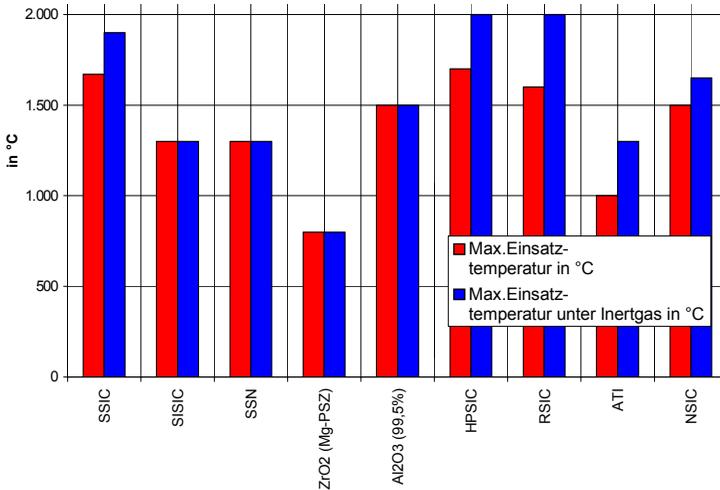


**Grafik 1:** Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

Bei Metallen liegen die Biege-, die Zug- und die Druckfestigkeit in vergleichbaren Größenordnungen. Nimmt man die so genannte 0,2% -Dehngrenze von Metallen zum Festigkeitsvergleich an, so sind selbst hochwarmfeste Stähle und Legierungen in den meisten Modifikationen bei 600 - 700 °C an der Grenze ihrer Festigkeit angekommen. Nur sehr wenige metallische Werkstoffe haben bei 1.000 °C überhaupt noch einen Festigkeitswert.

### 4.2.3.2 Temperaturbeständigkeit

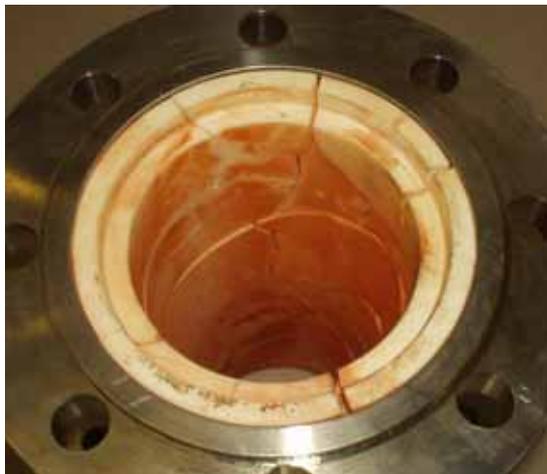
Relativ einfach sind die Verhältnisse bei der maximal zulässigen Einsatztemperatur. Alle Ingenieurkeramiken sind bis 400 °C absolut problemlos, die meisten sogar bis 800 °C bzw. 1.200 °C einsetzbar (Grafik 2).



**Grafik 2:** Maximale Einsatztemperatur von Keramiken

Meistens ist es nicht die absolute Temperatur, die Probleme bereiten könnte, sondern die Schockbeständigkeit, d. h. plötzliche Temperaturänderungen können zum Versagen führen.

#### 4.2.3.3 Thermoschockbeständigkeit

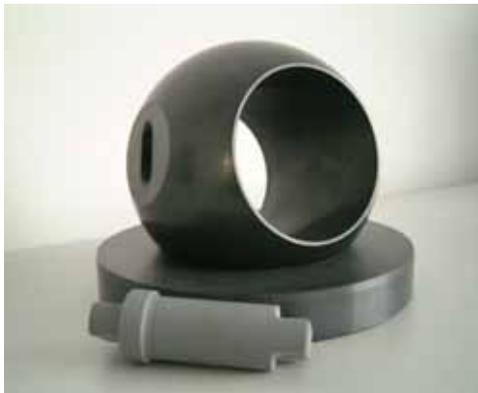


**Bild 3:** Auskleidung nach Thermoschockbelastung

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

Im folgenden sind z. B. für Kugeln bzw. Kúken von Háhnen die Materialien und die maximal zulássigen Thermoschocks aufgefúhrt.

- $\text{Al}_2\text{O}_3$             80 K      Aluminiumoxid
- $\text{ZrO}_2$               250 K     Zirkonoxid
- SSIC                300 K     drucklos gesintertes Siliziumkarbid,
- HPSIC              350 K     heißgepresstes Siliziumkarbid,
- SSN                350 – 500 K     Siliziumnitrid (Bild 4).



**Bild 4:** Armaturenbauteile aus SSN für HT-Anwendungen

Für Húlsen oder Teile mit einfachen rohráhnlíchen Geometrien und Wanddicken von 5 bis 10 mm kúnnen wesentlich hóhere Thermoschocks zugelassen werden:

- $\text{Al}_2\text{O}_3$             120 K     Aluminiumoxid
- $\text{ZrO}_2$               350 K     Zirkonoxid
- SSIC                350 K     drucklos gesintertes Siliziumkarbid,
- SISIC               350 K     Siliziuminfiltriertes Siliziumkarbid,
- SSN                600 K     Siliziumnitrid (Bild 10).

- HPSIC            400 K        heißgepresstes Siliziumkarbid,
- ATI                1.300 K      Aluminiumtitanat,
- RSIC              1.000 K      rekristallisiertes Siliziumkarbid,
- NSIC              600 K        nitridgebundenen Siliziumkarbid,

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



**Bild 5:** Bauteile aus SSN in einem Kugelhahn für flüssiges Zink

#### 4.2.3.4 Korrosionsbeständigkeit

Ein ganz wichtiger Parameter für den Einsatz von Keramik 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.

Die bekannten Beständigkeitsangaben sind in der Regel für Raum- und Siedetemperatur ermittelt und gelten nicht oder nur bedingt für extrem hohe Temperaturen. Es muss auch immer davon ausgegangen werden, dass Beständigkeiten gegenüber einzelnen Reagenzien nicht gleich bedeutend sind mit der Beständigkeit gegenüber dem Gemisch der Reagenzien. Auch wirken die Dämpfe vieler Stoffe anders und extremer als die Flüssigkeiten.



**Bild 6:** Chemiekugelhahn

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.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ist in diesem Fall am besten geeignet. Bereits bei geringen Anteilen von Flußsäure versagen alle oxidischen Keramiken (Bild 7). Die beste Beständigkeit gegen Flußsäure haben unter den derzeit verfügbaren keramischen Materialien die Karbide.



**Bild 7:** Korrodierte Teile nach Einsatz im HF-haltigen Medium

#### 4.2.3.5 Wärmeleitfähigkeit und Isoliervermögen

Bei diesen Eigenschaften zeigen die verschiedenen Keramiken extrem unterschiedliche Werte. Die enorme Wärmeleitfähigkeit von Siliziumkarbiden, die mehrfach höher liegt als bei Stahl, wird zum Beispiel bei beheizten Armaturen (Bild 8) ausgenutzt.

Hier ist wichtig, dass die Heizenergie schnell auf das Medium übertragen werden kann.



**Bild 8:** Keramikarmatur mit 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 1/9 der Wärmeleitfähigkeit von Stahl)



**Bild 9:** HT-Armatur mit  $ZrO_2$ -Keramikinnenleben

### 4.2.4 Konstruktive Lösungen und Beispiele

Die Armaturen werden entsprechend Ihrer Einteilung in Gruppen nach der Anwendungstemperatur beschrieben.

#### 4.2.4.1 Armaturen bis 450 °C

Die Temperaturgrenze wird durch die Verwendung von Graphit als Dichtwerkstoff bestimmt. Alle bekannten Bauarten von Armaturen sind in dieser Gruppe möglich. In der Regel haben die Armaturen ein metallisches Gehäuse ohne Kühlung. Die keramischen Komponenten werden nach der korrosiven Belastung, den Thermoschockanforderungen und nach der Benetzbarkeit ausgewählt. Setzt man z. B. SSN – Bauteile ein, sind keine Thermoschockprobleme zu befürchten. Oft sind die Kugeln bei Armaturen dieser Gruppe noch aus Zirkonoxid. Bei darüber hinaus gehenden Temperaturen verlieren Zirkonoxidbauteile ihre Festigkeit.

Beispiele für die Gruppe bis 450 °C sind:

FCC-Slurry-Regelarmatur in Raffinerien (Bild 10).

Das Medium ist ein Schwerölgemisch mit vielen Verunreinigungen und vor allem mit Katalysatoranteilen, die hoch abrasiv wirken. Die Medientemperaturen liegen bei 360 - 450 °C, wobei der mögliche Thermoschock mit 350 K angenommen werden muss. Lediglich mit SSN – Komponenten sind diese Verhältnisse zu beherrschen.



**Bild 10:** Slurry - Armatur

In Recyclinganlagen (Bild 11) zur Vergasung von Reststoffen fällt ein Quentschwasser (genannt Russwasser) an, welches niveaugeregelt werden muss bei Temperaturen bis 320 °C und einem Druck bis 32 bar mit einem maximalem Thermoschock bis 300 K. Unter diesen Bedingungen können SSIC – Komponenten zum Einsatz kommen.



**Bild 11:** Rußwasserausschleusearmatur

In anderen Recyclinganlagen entstehen Kunststoffschmelzen mit Temperaturen bis 450 °C und einem Druck bis 21 bar. Der maximal auftretende Thermoschock liegt bei 250 K, so dass auch Zirkonoxidkomponenten (Bild 12) die Schockforderungen erfüllen. Die Festigkeitsanforderungen sind ohnehin am besten mit  $ZrO_2$  – Komponenten zu erfüllen.



**Bild 12:** Kunststoffschmelzenarmatur

Bei der  $\text{TiO}_2$  – Herstellung sind ebenfalls Armaturen der Gruppe bis  $450\text{ }^\circ\text{C}$  zu finden. Ein Chlorgas mit  $\text{TiO}_2$  – Anteilen ist bei  $350\text{ }^\circ\text{C}$  und einem Druck von bis 5,3 bar sicher abzusperrern. Wegen der großen Nennweite und der damit verbundenen mechanischen Anforderungen sind SSN – Bauteile zum Einsatz (Bild 13) gekommen.



**Bild 13:**  $\text{Cl}_2$  -Gasarmatur

#### 4.2.4.2 Armaturen bis 850 °C

Diese Temperaturgrenze wird durch die Anwendung von Sonderdichtwerkstoffen, wie z. B. Glimmer, gekammerten Graphit und Mineralfaserwerkstoffen mit Metallkaschierung bestimmt. Alle Bauarten sind prinzipiell möglich. Es sind aber schon Einschränkungen wegen der Thermoschockprobleme und der Festigkeit zu beachten.

Aus Gründen der möglichen Thermoschockprobleme und der schon auftretenden Festigkeitsverluste bei metallischen Gehäusen, sind diese Armaturen in der Regel mit Kühl- und Heizmantel (Bild 14) versehen.



**Bild 14:** Armatur mit Heizmantel

Auch bei der Anwendung von SSN können bereits Thermoschockprobleme auftreten. Es sei hier wiederholt, dass dichte Keramikwerkstoffe maximal mit SSN 500 – 600 K verkraften. Sind größere schlagartige Temperaturschwankungen zu erwarten, und dabei sind auch die Havariefälle in die Betrachtung einzubeziehen, müssen bereits mehrschichtige Keramiken eingesetzt werden.

Als Beispiele seien hier angeführt:

Bei der Herstellung von Silizium werden Armaturen (Bild 15) mit Salzsäuredämpfen bis 750 °C und einem Druck bis 5 bar konfrontiert. Wegen des noch beherrschbaren Thermoschocks von maximal 350 K wird ein Spezial - SiC eingesetzt.



**Bild 15:** HCl-Siliziumstaubarmatur



**Bild 16:** Zinkarmatur

Bis an die Grenze des möglichen wird eine Armatur (Bild 16) in flüssigem Zink bei Temperaturen bis 650 °C und einem auftretenden Thermoschock bis 500 K belastete. Ein Kugelhahn mit SSN – Komponenten bewältigt hier die Anforderungen mit Erfolg.

Ein weiteres Beispiel stammt wieder aus dem Raffineriebereich. Der sogenannte Katalysatorabzug (FCC) belastet die Armatur (Bild 17) bis 750 °C bei einem Druck von 5 - 7 bar. Der Thermoschock ist mit 250 K relativ moderat. Wegen des extrem schleißenden Mediums (FCC) können jedoch nur SiC – Werkstoffe in Frage kommen.



**Bild 17:** Katalysatorabzugsarmatur bei der Prüfung

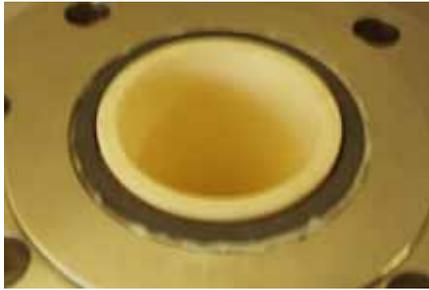
Ein weiteres Beispiel für diese Gruppe bis 850 °C findet man in einer Eindampfanlage für Schwarzlauge. Ein Gasgemisch aus  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4\text{N}_2$  und  $\text{H}_2\text{S}$  bei Temperaturen bis 800 °C muss sicher und dicht abgesperrt werden.  $\text{ZrO}_2$  – Komponenten in der Armatur (Bild 18) erfüllen hier die Erfordernisse.



**Bild 18:** Gasarmatur 800 °C

### 4.2.4.3 Armaturen bis 1.200 °C

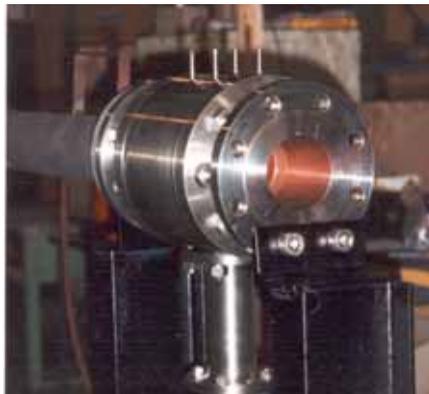
Diese Gruppe wird durch den Einsatz von Sonderdichtwerkstoffen aus keramischen Fasern mit Metallkaschierung begrenzt. Typisch ist, dass die Keramikbauteile mehrlagig (Bild 19) ausgeführt werden, um die Belastungen zu splitten.



**Bild 19:** Mehrlagige Keramik

Die metallischen Gehäuseelemente sind grundsätzlich gekühlt und beheizt.

Als Beispiele können Versuchsanlagen (Bild 20) benannt werden, wo Verbrennungsgase mit hohen Feststoffanteilen mit Temperaturen bis 1.050 °C bei 10 bar und einem maximalem Thermoschock von 550 K mit SSN und Verbrennungsgasen bis 1.200 °C und 40 bar, aber mit einem Thermoschock bis 1.000 K, mit mehrschichtiger Keramik SSN, NSIC und ATI erfolgreich beherrscht werden.



**Bild 20:** Verbrennungsversuchsanlage

#### 4.2.4.4 Armaturen über 1.200 °C

Armaturen über 1.200 °C sind bisher nur mit relativ großen Einschränkungen einsetzbar. So sind die bisher bekannten Beispiele nicht für höhere Drücke geeignet und sind nicht dauerhaft dicht. In der Regel sind sie nur für eine begrenzte Zyklenzahl geeignet.

Typisch ist auch hier die Mehrlagigkeit der Keramik (Bild 21) und die Kombination mit Feuerfest- und Isoliermaterialien.



**Bild 21:** mehrlagige Keramik in Schlackeabsticharmatur

Als Beispiel sei hier eine Schlackeabsticharmatur (Bild 21) genannt, die mit Schlacke bis 1.350 °C und Brenngas bis 1.650 °C belastet wird, wobei ein Thermoschock bis 1.300 K auftreten kann.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 21) finden sich auf den folgenden Seiten.

**Maschinenbau**

**Hochtemperaturarmaturen**

Heinz Albert  
Cera System Verschleißschutz GmbH  
Hermsdorf



4.2. Hochtemperaturarmaturen - Folie 1

## **Keramische Hochtemperaturarmaturen**

- Inhalt:
- Einleitung
  - Korrosionsprobleme von Metallen
  - Nutzbare Eigenschaften von Keramiken
    - ⊗ Mechanische Festigkeit
    - ⊗ Temperaturfestigkeit
    - ⊗ Thermoschockbeständigkeit
    - ⊗ Korrosionsbeständigkeit
    - ⊗ Wärmeleitfähigkeit und -isoliervermögen
  - Konstruktive Lösungen und Beispiele
    - ⊗ Armaturen bis 450 °C
    - ⊗ Armaturen bis 850 °C
    - ⊗ Armaturen bis 1200 °C
    - ⊗ Armaturen über 1200°C

**Einleitung**



**Hochtemperatur = 180°C - 1.600°C !**

 Kunststoffe scheiden aus  
Metalle verlieren Festigkeit  
Medien als Schmelze/Dampf

Am häufigsten eingesetzte Keramiken  
= Werkstoffe aus den Gruppen:

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
  - ATI
  - ZrO<sub>2</sub>
  - SSiC
  - SiSiC
  - RSiC
  - NSiC
  - SSN
- Aluminiumoxid,
  - Aluminiumtitanat,
  - Zirkonoxid,
  - drucklos gesintertes Siliziumkarbid,
  - Silizium-infiltriertes Siliziumkarbid,
  - rekristallisiertes Siliziumkarbid,
  - Nitrid-gebundenes Siliziumkarbid,
  - Siliziumnitrid.



**gezielt  
anwenden !  
= Erfolg**

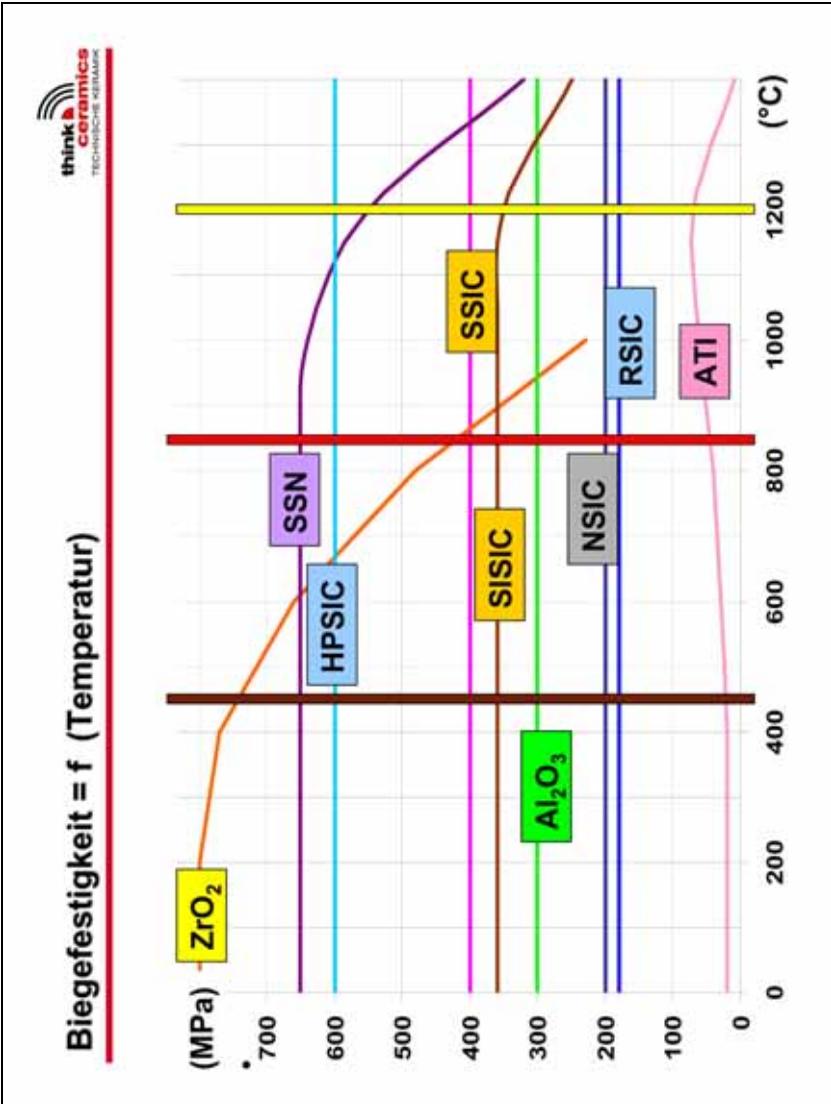


## **Korrosionsprobleme von Metallen**

<b>Oxidation</b>	<b>über 1.000°C</b>
<b>Aufkohlung</b>	<b>bei 500 - 800°C</b>
<b>Sulfidierung</b>	<b>bei 650 - 850°C</b>
<b>Chlorierung</b>	<b>bei 550 - 850°C</b>
<b>Nitrierung</b>	<b>bei 300 - 500°C</b>



**Versprödung und Festigkeitsverlust**



4.2. Hochtemperaturarmaturen - Folie 5

## Mechanische Festigkeit

**Druckfestigkeit** von dichten Ingenieurkeramiken ist wesentlich höher als bei Metallen. Druck belastete Teile sind prädestiniert zur Herstellung aus Keramik.

**Beispiel Kugelhahn:**  
DN 150 und 34 bar



Belastung 6 t

### Biegefestigkeit

- Siliziumnitrid und Zirkondioxid bei Normalbedingungen vergleichbar mit Stahl !
- Keramik bei  $T \geq 800 \text{ °C}$  konkurrenzlos
- Festigkeit von Stahl nimmt ab  $300 \text{ °C}$  ab

### Zugfestigkeit

- oft  $< 1/3$  der Biegefestigkeit!



“Keramikgerecht” konstruieren !  
Spannungsverteilung berücksichtigen !



## Temperaturbeständigkeit

### Zulässige Einsatztemperatur:

bis 400°C - alle

bis 800°C bzw. 1.200°C - die meisten

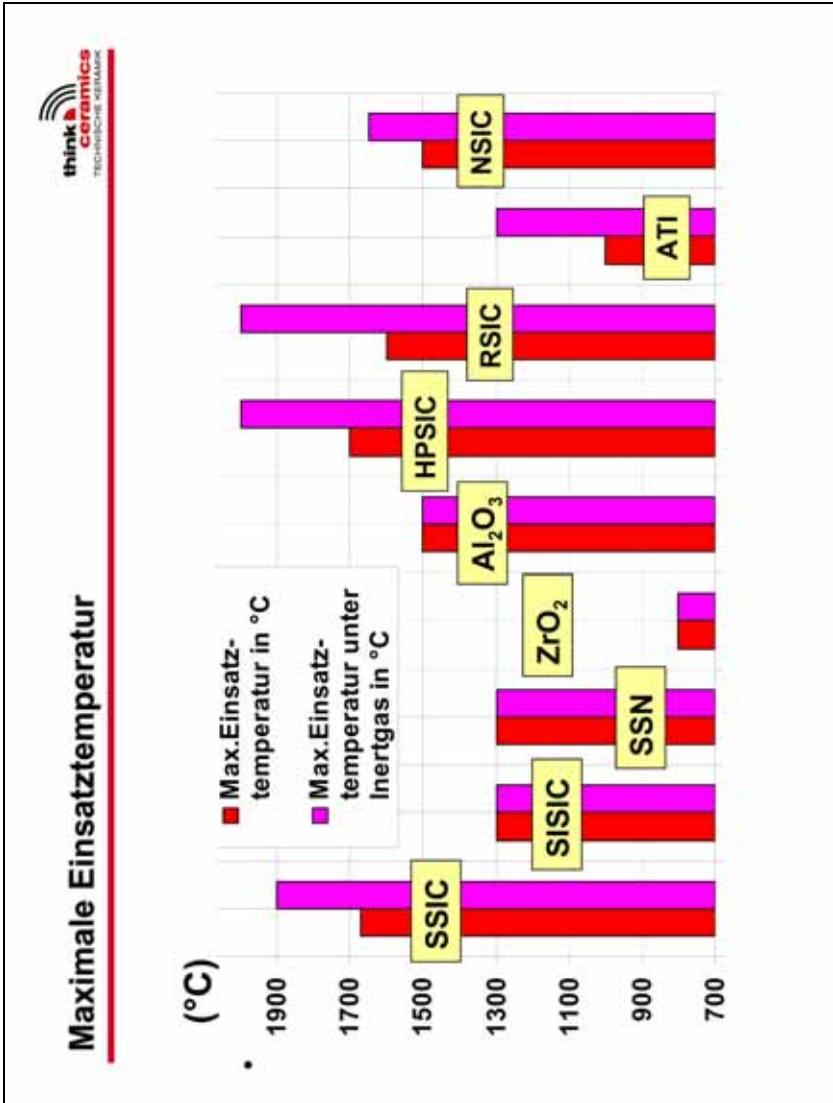
Ingenieurkeramik **problemlos**

HT -Kugelhahn auf dem Prüfstand



**Problematischer ist die  
Thermoschockbeständigkeit**

Bauteile aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$  in einem Kugelhahn  
für flüssiges Zink



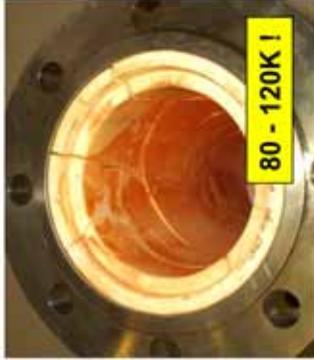
4.2. Hochtemperaturarmaturen - Folie 8

## Thermoschockbeständigkeit



Thermoschockbeständigkeit auch abhängig von

- geometrischer Form,
- Herstellverfahren und
- weiteren Belastungen.

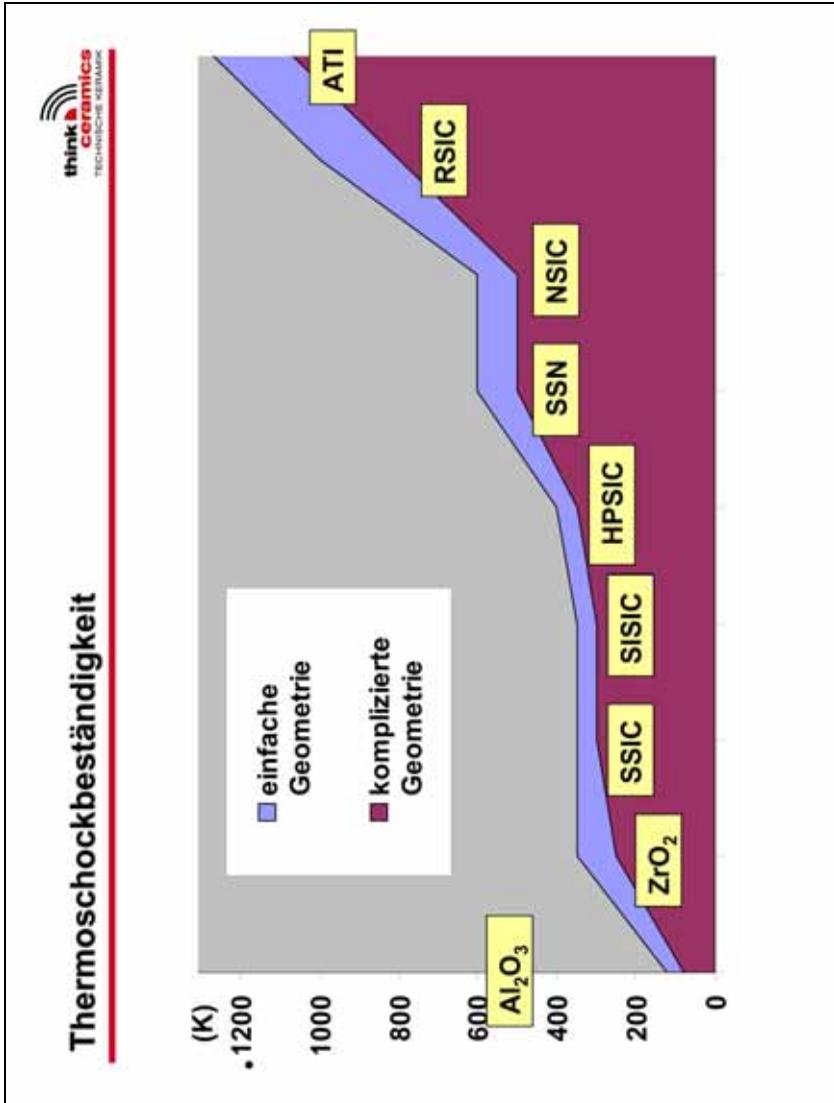


Armatur mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Auskleidung  
nach Thermoschockbelastung



Armaturenbauteile aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$

### 4.2. Hochtemperaturarmaturen - Folie 9



4.2. Hochtemperaturarmaturen - Folie 10

## Korrosionsbeständigkeit

### Allgemein gute Korrosionsbeständigkeit

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

Chemiekugelhahn - alle medien-berührten Teile aus Keramik

**besonders kritisch:**

- **Wasserdampf und Flußsäure**

$\text{Al}_2\text{O}_3$  - hydrothermal gut beständig !

Karbide und Nitride bis  $250^\circ\text{C}/350^\circ\text{C}$  beständig !

Gegen Flußsäure nur SSiC beständig !

Korrodierte Teile nach Einsatz im F-haltigem Medium



## Wärmeleitfähigkeit und -isoliervermögen



Verschiedene Keramiken - extrem unterschiedliche Werte !

Karbide - enorme Wärmeleitfähigkeit  
- mehrfach höher als bei Stahl

bei beheizten Armaturen  
muss Heizenergie schnell  
übertragen werden



bei HT-Anwendungen oft  
gute Isolation gewünscht



ZrO<sub>2</sub>: Wärmeleitfähigkeit nur 1/9 von Stahl

**Armaturen bis 450°C**



- Dichtwerkstoff Graphit
- alle Bauarten möglich
- metallisches Gehäuse ohne Kühlung
- Keramik nach
  - chemischer Beständigkeit
  - Thermoschockverhältnissen
  - Benetzbarkeit
- keine Thermoschockprobleme bei Einsatz von SSN



**Armaturen bis 450°C - Beispiele**

**think ceramics**  
TECHNISCHE KERAMIK

**FCC-Slurry (Raffinerie)**  
T = 360 - 450°C p = 11 bar  
maximaler Thermoschock < 350 K

**SSN**

**Rußwasser (Recyclinganlage)**  
T = 230 - 320°C p = 32 bar  
maximaler  
Thermoschock < 300 K

**SSIC**

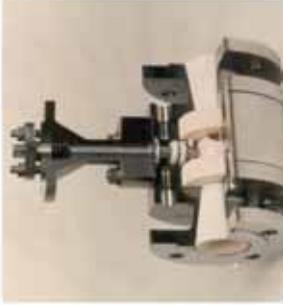


4.2. Hochtemperaturarmaturen - Folie 14

**Armaturen bis 450°C - Beispiele**



**Kunststoffschmelze (Recyclinganlage)**  
T = 450°C p = 21 bar  
maximaler Thermoschock < 250 K



**ZrO<sub>2</sub>**

**Cl<sub>2</sub>-Gas mit TiCl<sub>3</sub> (TiO<sub>2</sub>-Herstellung)**  
T = 350°C p = 5,3 bar  
maximaler Thermoschock < 300 K



**SSN**



4.2. Hochtemperaturarmaturen - Folie 15

## Armaturen bis 850°C

- Dichtwerkstoffe - Sonderdichtwerkstoffe (Glimmer, Metalle)
- alle Bauarten möglich, Einschränkungen wegen Festigkeit
- metallisches Gehäuse mit Kühlung/Heizung



- **Keramikauswahl nach**
  - chemischer Beständigkeit
  - Thermoschockverhältnissen
  - Benetzbarkeit
- **Thermoschockprobleme bei allen dichten Keramiken möglich !**

**Armaturen bis 850°C - Beispiele**



Siliziumstaub, HCL  
T = 750°C p = 5 bar  
maximaler Thermoschock 350 K



**Spezial SiC**



Zink, flüssig  
T = 650°C  
maximaler Thermoschock 500 K

**SSN**



4.2. Hochtemperaturarmaturen - Folie 17

## Armaturen bis 850°C - Beispiele

FCC -Katalysatorabzug (Raffinerie)  
T = 750°C p = 5 bar  
maximaler Thermoschock 250 K



HPSiC



Gase (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S)  
(Eindampfanlage für Schwarzlauge)  
T = 800°C  
maximaler Thermoschock 250 K

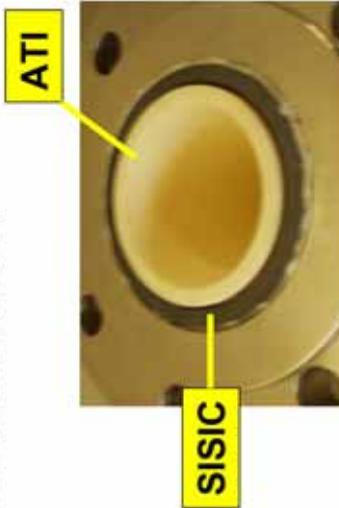
ZrO<sub>2</sub>



## Armaturen bis 1.200°C



- Dichtwerkstoffe - Sonderdichtwerkstoffe (Keramik, Metalle)
- Keramikbauteile mehrlagig
- metallisches Gehäuse mit Kühlung und Heizung
- Keramik nach
  - mechanischer Festigkeit
  - chemischer Beständigkeit
  - Thermoschockverhältnissen
  - Benetzbarkeit
- Thermoschockprobleme bei allen dichten Keramiken möglich !



## Armaturen bis 1.200°C - Beispiele

Verbrennungsgase (Versuchsanlage)  
T = 1.050°C p = 10 bar  
maximaler Thermoschock 550 K

SSN



Verbrennungsgase (Versuchsanlage)  
T = 1.200°C p = 40 bar  
maximaler Thermoschock 1.000 K

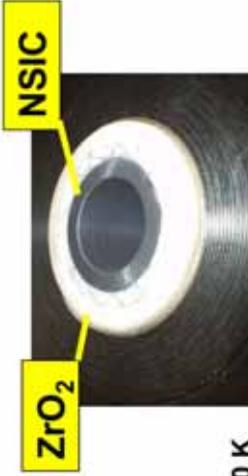
SSN, NSIC, ATI



## Armaturen über 1.200°C



- bisher nicht für größere Drücke geeignet
- bisher keine dauerhafte Dichtheit
- begrenzte Zyklenzahl
- mehrlagige Keramik/Feuerfestmaterial/Isoliermaterial
- Thermoschockprobleme bei allen dichten Keramiken möglich !



Beispiel:  
Schlackeabsticharmatur  
T = 1.350 / 1.650°C  
maximaler Thermoschock 1.300 K