

4. Chemie- und Prozesstechnik

4.1 Keramischer Rohrverschleißschutz kompakt und nennweitenkonform

- Heinz Albert
Cera System Verschleißschutz GmbH
Hermisdorf

Die Folien finden Sie ab Seite 311.

Inhalt:

- 4.1.1. Einleitung**
- 4.1.2. Probleme der bisherigen Systeme**
- 4.1.3. Typische Problemfälle in der Praxis**
- 4.1.4. Verschleißverhalten keramischer**
- 4.1.5. Theoretisch und tatsächlich notwendige Radien
bei Rohrbögen**
- 4.1.6. Probleme des Einsatzes keramisch ausgekleideter
Systeme bei hohen Temperaturen**
- 4.1.7. Anwendungsbeispiel**

4.1.1. Einleitung

Keramisch ausgekleidete Rohrleitungssysteme bzw. auch keramische Rohre ohne Panzerung (Bild 1) werden schon sehr lange in der Industrie genutzt.

So mancher wird sich fragen, was kann es da neues geben?

Die Erfahrungen in der Praxis zeigen immer wieder, dass Verschleißprobleme in so manchem System total unterschätzt werden. So kommt es zu häufigen Anlagenstillstand, zu unerwarteten Störungen und zu Problemen, die Leitungsdurchbrüche (Bild 2) so mit sich bringen.

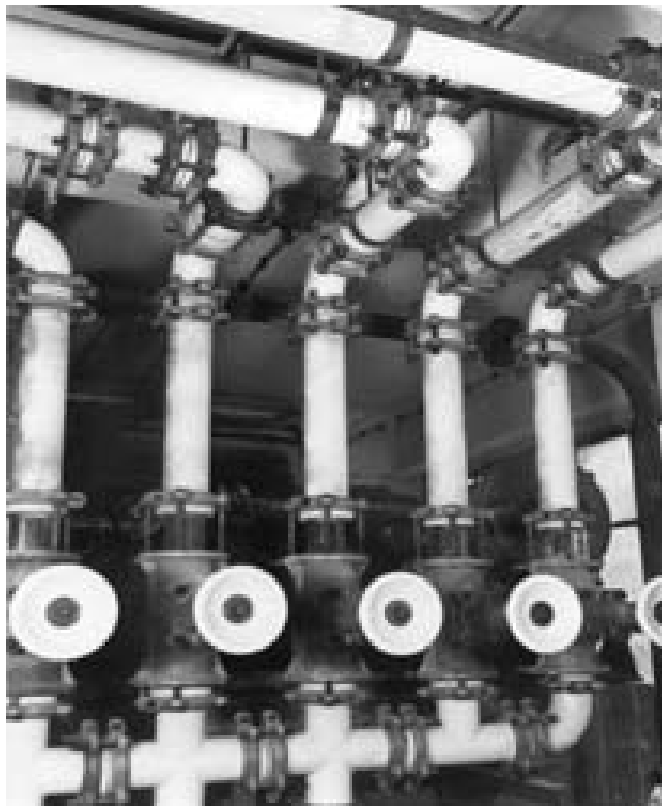


Bild 1: Rohrsystem aus Hartporzellan



Bild 2: Zerschossener Rohrbogen DN 80, R1000

4.1.2. Probleme der bisherigen Systeme

Bisher sind alle am Markt bekannten keramisch ausgekleidete Rohrsysteme durch Nennweitensprüngen charakterisiert, d.h. ein entsprechend freier Querschnitt hat nicht den Flansch dieser Nennweite, sondern in der Regel einen 1 bis 3 Nennweiten größeren (Bild 3).



Bild 3: Flansch DN 150 zum Rohr DN 80

Die keramisch ausgekleideten Systeme sind wesentlich schwerer als normale und erfordern daher besondere Stützsysteme und besondere Auslegung.

Stellt man in einem normalen System erhöhten Verschleiß fest, ist mit dem bisher bekannten keramischen Systemen nicht ohne weiteres Abhilfe zu schaffen, da die Systeme nicht kompatibel sind.

Unter Verwendung hochwertiger, aber dünnwandiger Keramik ist ein neues keramisch ausgekleidetes System entwickelt worden, bei dem keine Nennweitensprünge erforderlich sind und somit zu jeder Zeit auch nachträglich nachgerüstet werden kann.

Ein weiteres Problem liegt in der Verarbeitung der keramischen Materialien, nämlich dass man komplizierte Formen wie Bögen aus Segmenten und einzelnen Teilen zusammensetzt. Daher kommt es zu einer Vielzahl von Stößen und Kanten, die erheblich Probleme

erzeugen können, wenn die Verarbeitung nicht ordnungsgemäß erfolgt. Dazu mehr im weiteren Vortrag.

4.1.3. Typische Problemfälle in der Praxis

Typische Problemzonen oder –fälle sind:

- Rohrerweiterungen und –stücke nach Pumpen
- Rohrstücke nach Regelarmaturen
- Rohrstücke nach Entspannungsarmaturen
- Rohrbögen
- T – Stücke
- Umlenktöpfe
- Verteilerboxen (Bild 4)
- Strahlapparate/Aufgabestationen



Bild 4: Verteilerbox

Um zu verstehen, wie Fehler beim Verschleißschutz vermieden werden können, muss einiges zu den theoretischen Grundlagen gesagt

werden. Der Verschleiß bzw. das Ausmaß des Verschleißes ist vom Zusammenspiel von vielen Einflußgrößen abhängig, wie:

- Transportfluid flüssig / gasförmig
- Teilchengröße, -härte, -dichte
- Geschwindigkeit $\Rightarrow$ „Energieinhalt“ der Teilchen
- Aufprallwinkel
- Materialeigenschaften des Gegenparts

Hier dazu ein paar grundsätzliche Aussagen:

Ein hydraulischer Transport ist harmloser als ein Pneumatiktransport. Die Flüssigkeit fungiert auch als „Puffer“, als „Dämpfer“, die Fließgeschwindigkeiten sind meist niedriger als beim Pneumatiktransport. Um den Einfluss von Partikelgröße, -härte und -dichte und das Zusammenspiel mit Geschwindigkeit und Eigenschaften des Gegenparts zu verstehen, muss man die genauen Bedingungen analysieren, um die konkret auftretenden Verschleißmechanismen ableiten zu können.

Grundsätzlich gibt es Reib- und Prallverschleiß.

Beim Reibverschleiß gleitet das Abrassiv über die Oberfläche und „zerkratzt“ diese. Harte Oberflächen widerstehen dieser Verschleißart besser als weiche.

Bei besonders langsamen Bewegungen (Strömungen) und entsprechend „zäher“ Oberfläche können die Teilchen auch „abrollen“ ohne einen Verschleiß zu verursachen.

Beim Prallverschleiß „stürzt“ ein Teilchen auf eine Oberfläche mit einer entsprechenden kinetischen Energie und „schlägt“ Partikel aus der Oberfläche heraus. Je kompakter und schwerer die Teilchen sind, um so mehr Energie tragen diese in die Oberfläche ein, und um so größer ist der Verschleiß. Elastische Materialien können dieser Belastung z.T. ohne Verschleiß widerstehen.

Hartstoffe wie Keramiken sind hier empfindlicher als einfache Metalle, Kunststoffe oder Elastomere.

In der Praxis treten immer Kombinationen dieser Verschleißarten auf. Die Verhältnisse sind meistens nicht konstant. Die Beurteilung ist entsprechend kompliziert.

4.1.4. Strahlverschleißverhalten keramischer Materialien

Um die Problematik konkreter darzustellen, hier ein häufig auftretendes Beispiel:

Fast alle Verunreinigungen enthalten Quarzbestandteile (Sand). Quarzsand an sich wird ebenfalls häufig als Hilfsstoff in Wirbelschicht-öfen oder als einfaches Abrasiv mit Sandstrahlgebläsen gefördert.

Es wurden daher an diversen Werkstoffen mit Strahlquarzsand $d_{50} = 0,24$ Strahlverschleißuntersuchungen durchgeführt.

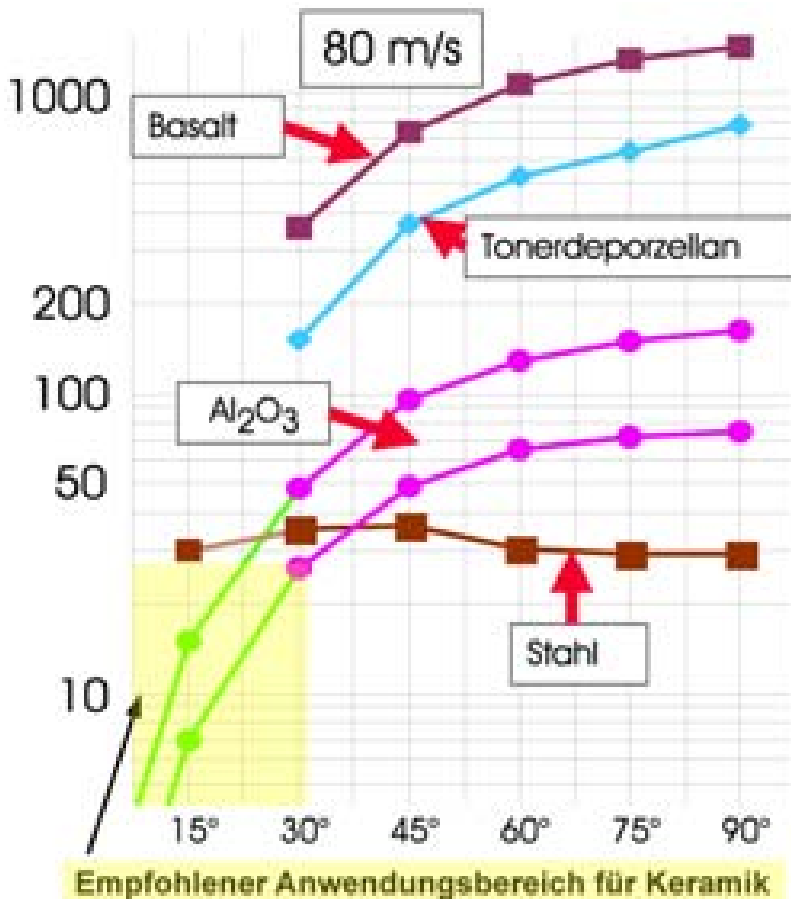


Bild 6: Volumenschleiß IV bei einer Auftreffgeschwindigkeit 80 m/s in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel

Auswertungen aus diesen Untersuchungen:

- Bei Auftreffwinkeln über 30° und hohen Partikelgeschwindigkeiten treten bei allen untersuchten Werkstoffen hohe Verschleißraten auf.
- Bei Stahl ST 38 nimmt der Verschleiß mit zunehmenden Winkel leicht ab bzw. bleibt gleich.
- Bei einem Auftreffwinkel von ca. 30° liegt der Verschleiß von Aluminiumoxid gleich mit dem Verschleiß von ST 38.
- Bei einem Auftreffwinkel von über 30° liegt der Verschleiß von Keramik höher als von Stahl. Bei 90° ist der Abtrag 5 mal höher als bei Stahl ST 38.
- Bei einem Auftreffwinkel unter 30° liegt der Verschleiß von Keramik deutlich niedriger als bei Stahl.
- Schmelzbasalt hat den 8 bis 10 –fachen Verschleiß von Aluminiumoxid.
- Eine Erhöhung der Geschwindigkeit von 50 m/s auf 80 m/s (1,6 –fach) verdreifacht den Abtrag.

Da die Versuche schwer für Winkel unter 15° zu machen sind, werden folgende Aussagen durch Interpolation gewonnen:

- Bei Keramik gibt es in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit immer einen Winkel, bei dem praktisch kein Verschleiß auftritt.
 ⇒ z.B.: **bei 50 m/s unter 15° praktisch kein Verschleiß**
 bei 30 m/s unter 25° praktisch kein Verschleiß
- Je geringer die Härte der **transportierten** abrasiven **Stoffe** ist,
 - desto größer ist der Winkel, bei dem praktisch kein Verschleiß auftritt und
 - desto höher ist die Geschwindigkeit bei der Verschleiß gravierend zunimmt.
- Die Abnahme der Teilchengröße hat die analoge Wirkung wie die abnehmende Härte.

Aus diesen gemessen und interpolierten Aussagen folgen weitere wichtige Fakten:

- Es gibt Verhältnisse, bei denen die Keramik schlechter ist als Stahl ST38!
 - bei 90° Aluminiumoxid 5 x schlechter
 - Schmelzbasalt u. Hartporzellan 45-50 x schlechter

-> eine Sandstrahlkabine wird nie mit Keramik ausgekleidet!

- **Stoßstellen, Lunker oder andere Defekte verursachen Turbulenzen, d.h. ein großer Auftreffwinkel entsteht. Der Verschleiß vervielfacht sich an dieser Stelle!**
- **Selbst eine gute Keramik wird durch Stöße, Kanten und Lunker schnell verschlissen! Ein einmal begonnener Verschleiß beschleunigt sich zwangsläufig dramatisch.**
- **Sobald Turbulenzen auftreten, ist keine Keramik dem Verschleiß gewachsen!**
 - > **Flashing oder Kavitation unter diesen Verhältnissen ist auch nicht mit Keramik zu beherrschen!**

Diese Dramatik gilt natürlich nur für diese Verhältnisse, d.h. Strahlsand $d_{50} = 0,24 \text{ mm}$ mit Geschwindigkeiten über 30 m/s.

Jedes Abrassiv mit geringer Härte (fast alle Salze liegen in der Härte viel niedriger als Quarzsand) macht viel geringeren Schaden.

Geschwindigkeiten von Suspensionen werden in der Praxis so niedrig eingestellt, dass gerade keine Sedimentation auftritt, d.h. praktisch 1 – 2 m/s. Unter diesen Verhältnissen haben wir selbst mit Schmelzbasalt, bei großen Radien und geringer Härte der Feststoffe geringen Verschleiß.

Fakt ist, dass Aluminiumoxid nur 10 – 12% des Verschleißes gegenüber Schmelzbasalt oder Hartporzellan bringt, oder die Standzeit von Rohrbögen mit Aluminiumoxid – Auskleidung

8 –10 mal größer ist, wenn die Bögen als geschlossene Bögen und nicht aus „gestückelten“ Rohrsegmenten gefertigt werden. Sind die Rohrbögen „gestückelt“, kann die oben geschilderte Situation dazu führen, dass keine Verbesserung durch den Einsatz hochwertiger Keramik eintritt.

Die Praxis hat dieses inzwischen mehrfach bestätigt.

Ein ebenfalls ganz wichtiger Parameter ist die Korrosionsbeständigkeit. Wenn der Rohrleitungs- oder Auskleidungswerkstoff dem Medium chemisch nicht gewachsen ist, wird der Verschleiß zusätzlich verstärkt.

4.1.5. Theoretisch und tatsächlich notwendige Radien bei Rohrbögen

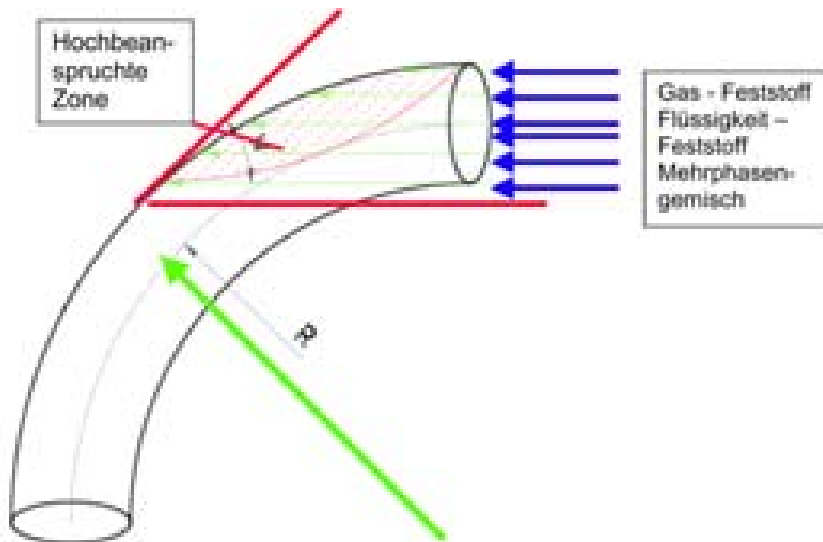


Bild 9: Hauptstrahlverschleißzone im Rohrbogen

Die kritische Zone ist in Bild 9 schematisch dargestellt. In der Praxis kann dies auch sehr häufig beobachtet werden (Bild 10).

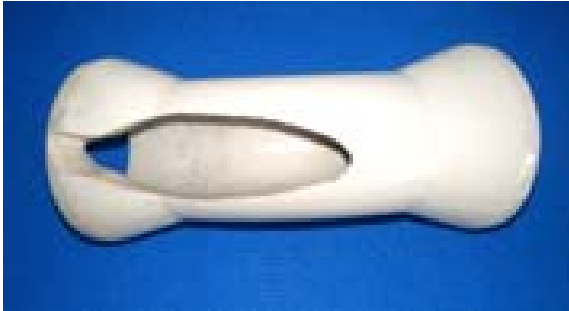


Bild 10: zerstrahlter Porzellanrohrbogen DN 50

Für die Abhängigkeit des Auftreffwinkels w vom Radius R und Durchmesser D oder der Nennweite (freier Querschnitt) gilt:

$$R = D/2 * (1 + \cos w) / (1 - \cos w)$$

Im bereits oben behandelten Fall müsste man für den idealen Winkel 15° einsetzen, um den Radius zu ermitteln, bei dem kaum Verschleiß auftritt. Daraus folgt:

$$R_{\min} = 28,82 D$$

Das würde bei **DN 100** z.B. **2,88 m** bedeuten.

Praktisch tritt dieser Fall aber nur sehr selten auf (z.B. Sandstrahl direkt ins Rohr mit wenig Feststoff). In der Regel ist die Geschwindigkeit wesentlich geringer, evtl. auch eine Flüssigkeit als „Puffer“ vorhanden, oder soviel Feststoff im Rohr, dass der „theoretische Durchflieger“ nicht auftritt.

Daraus folgt, dass praktisch ein viel kleinerer Radius einsetzbar ist.

Als Faustregel gilt:

Bei Suspensionen mit einer Fließgeschwindigkeit bis 5 m/s, mit Feststoffen bis Härte 7 nach Mohs und Teilchengröße bis 250 μm bereiten Radien nach Bauform BA 3 (Bild 11) oder BA 5 in keramisch ausgekleideten Rohrbögen keine Probleme.

Bei pneumatischer Förderung als Dichtstromförderung sind Radien $R = 250$ und $R = 500$ ausreichend für Nennweiten DN 50 – DN 150



Bild 11: Rohrbogen DN 100, R 195, 90°

4.1.6. Probleme des Einsatzes keramisch ausgekleideter Systeme bei höheren Temperaturen

Eine Verlegung keramischer Rohrleitungen ohne Panzerung ist unter bestimmten Bedingungen möglich, aber eigentlich nicht mehr üblich. 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 einer Panzerung ist zu beachten, dass bei höheren Temperaturen die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien zu kompensieren sind.

Pauschal ist zu sagen:

- Bei Temperaturen bis 250°C treten auch bei massiver Zementkittung keine Probleme auf.
- Bei höheren Temperaturen sind sowohl die unterschiedlichen Längendehnungen wie auch das unterschiedliche Streckverhalten der Bögen zu kompensieren.
- Eine gleichzeitige Wärmeisolierung ist oftmals gewünscht und auch hilfreich.

Alle Ingenieurkeramiken sind bis 400°C absolut problemlos, die meisten sogar bis 800°C bzw. 1.200°C einsetzbar. Meistens ist es nicht die Temperaturhöhe, die Probleme bereiten könnte, sondern die Schockbeständigkeit. Plötzliche Temperaturänderungen können zum Versagen führen.

Für Rohrbögen mit Wanddicken von 5 bis 10 mm können folgende Thermoschocks zugelassen werden:

Werkstoffe	Thermoschock
Aluminiumoxid	120 K
Siliciumcarbid (SiSiC)	500 K
Siliciumnitrid	600 K

Bei langsamer Erwärmung bzw. Abkühlung können die Temperaturunterschiede ein mehrfaches dieser Werte betragen.

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

4.1.7. Anwendungsbeispiele

4.1.7.1. α -Gips-Anlage



Bild 12: Rohrbogen DN 50, PN 16, R 1000 einer α -Gips-Anlage

Ein Baustoff mit großem Wachstumspotential und Zukunft ist α -Gips, der sich durch sehr hohe Festigkeit auszeichnet. Problematisch ist im Herstellungsprozeß vor allem der enorme Verschleiß und die Möglichkeit der Ablagerungen in der Abkühlungs und Trocknungsphase.

4.1.7.2. Flüssigkeitstransport von Filtrationsasche im Kraftwerk



Bild 13: Komplette keramisch ausgekleidetes Rohrsystem DN 50 – DN 80, PN 16

4.1.7.3. Verteilerboxen im Flüssigkeitstransport von Rückstandssalzen



Bild 14: V-Box DN 125, PN 40

4.1.7.4. Förderleitung für keramisches Pressgranulat



Bild 15: Keramischer und defekter metallischer Einlaufkrümmer DN 40 nach gleicher Einsatzzeit von 6 Monaten

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

Chemie- und Prozesstechnik

Keramischer Rohrverschleiß

Heinz Albert
Cera System Verschleißschutz GmbH
Hermisdorf





Keramischer Rohrverschleißschutz

Neues System - Kompakt und nennweitenkonform

Inhalt:

- Einleitung
- Probleme der bisherigen Systeme
- Typische Problemfälle in der Praxis
- Verschleißverhalten keramischer Werkstoffe
- Theoretisch und tatsächlich notwendige Radialen bei Rohrbögen
- Probleme des Einsatzes keramisch ausgekleideter Systeme bei hohen Temperaturen
- Anwendungsbeispiele

Einleitung

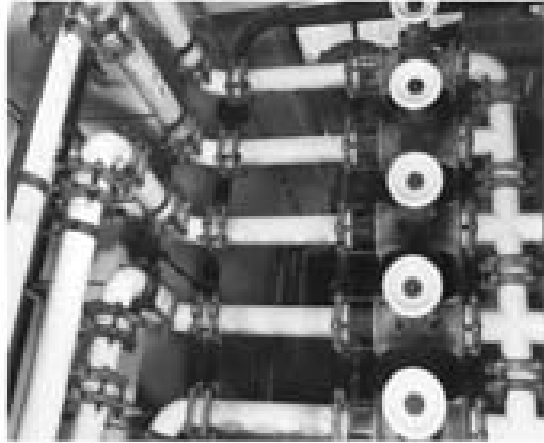
Sehr lange Tradition

Was kann es da neues geben?

In der Praxis immer wieder Probleme !



Defekter Rohrbogen DN 80



Porzellanrohrleitungssystem 1956

Probleme der bisherigen Systeme

- Nennweitensprünge
- hohes Gewicht
- besondere Auslegung notwendig
- besonderes Stützsystsem notwendig



Nicht kompatibel zu „normalen“ Systemen

Lösung

Nennweitenkonformes System

- Einsatz hochwertiger dünnwandiger Keramik
- keine Nennweitensprünge

Lösung

monolithische Teile



Nennweite 80 mit Flansch NW 125/150

• Vielzahl von Fügestellen

Typische Problemfälle in der Praxis

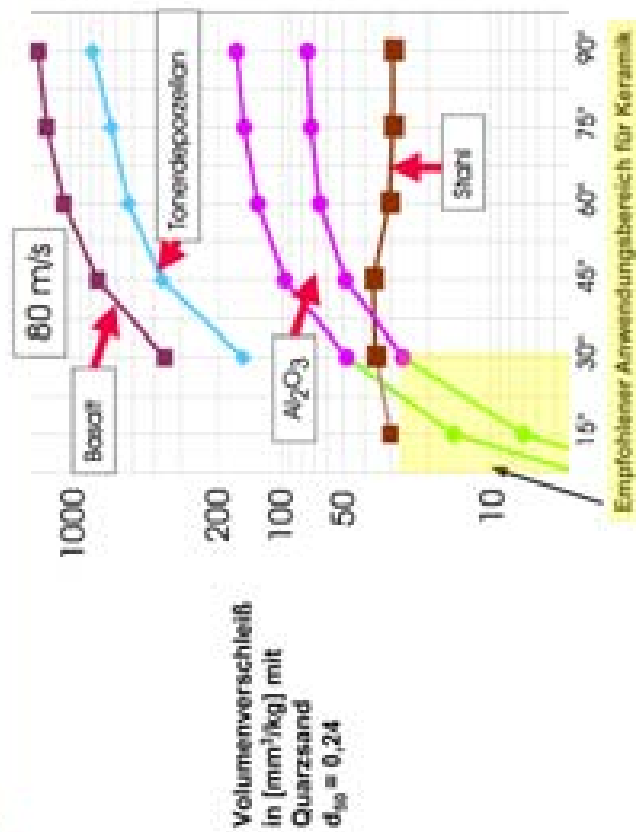
- Rohrerweiterungen und -stücke nach Pumpen
- Rohrstücke nach Regelarmaturen
- Rohrstücke nach
Entspannungsarmaturen
- Rohrbögen
- T - Stücke
- Umlenköpfe
- Verteilerboxen
- Strahlapparate
- Aufgabestationen



V-Box DN 125 PN40



Volumenverschleiß = f(Auftreffwinkel,-geschwindigkeit.)
think
ceramics
TECHNISCHE KERAMIK





Versuchsauswertungen

- Stahl - immer gleich schlecht (+30 %) !
- Bei Winkel ca. 30 ° - Verschleiß von Keramik = Verschleiß Stahl
- Bei Winkeln $\leq 30^\circ$ - Verschleiß von Keramik wesentlich geringer als bei Stahl
- Bei Winkeln $\geq 30^\circ$ - Verschleiß von Keramik größer als bei Stahl
- Verschleiß von Basalt oder Porzellan = 8 - 10 x Verschleiß von Al_2O_3
- Erhöhung der Geschwindigkeit auf $1,6 \times \Rightarrow$ 3 - facher Verschleiß

Kritischer Winkel
Kritische Geschwindigkeit



Verschleiß **minimiert**
gravierend zu

je größer die Teilchen
je schwerer/kompakter die Teilchen



desto kleiner der kritische Winkel,
desto kleiner die kritische
Geschwindigkeit

Diese Dramatik gilt nur für diese Verhältnisse (Quarzsand $d_{90} = 0,24$ mit $v \geq 30$ m/s)
kleiner Geschwindigkeit, geringere Härte, kleinere Teilchen

$\Rightarrow$ viel geringerer Verschleiß !



Genaue Analyse notwendig !

Schlußfolgerungen

Stoßstellen, Lunker, Defekte → Turbulenzen
großer Auftreffwinkel → Verschleiß vervielfacht sich !

Selbst eine gute Keramik wird bei Stößen, Kanten und Lunkern schnell verschlissen

Einmal begonnener Verschleiß beschleunigt sich zwangsläufig !

Sobald bei diesen Verhältnissen extreme Turbulenzen (Flashing, Kavitation) auftreten, ist dem Verschleiß auch keine Keramik gewachsen.

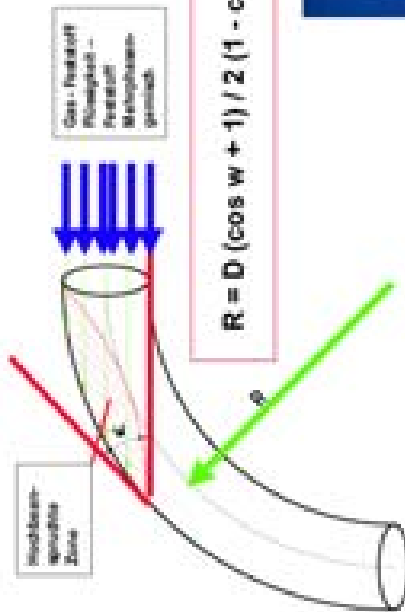
Standzeit von Al_2O_3 - Bögen = 8 - 10 -fache Standzeit von Basalt/Porzellan

Sind Rohrbögen „gestückelt“, kann sein, dass keine Verbesserung durch Einsatz hochwertiger Keramik eintritt.

Notwendige Radien bei Rohrbögen



kritische Zone eines Rohrbogens



R = Radius
D = Innendurchmesser
w = Maximaler
Auftrittswinkel



Zerstrahlter Porzellanrohrbogen DN 50

Faustregeln zur Radienauswahl bei Rohrbögen

Theoretisch für Rohrbogen DN 100 - Winkel $w = 15^\circ \Rightarrow R = 2,88 \text{ m}$

In der Praxis tritt dieser Fall kaum auf!

In der Regel:

- Geschwindigkeiten viel niedriger
- Flüssigkeit = Puffer
- Feststoff = Puffer

$\Rightarrow$ kaum „Durchflieger“

Suspensionen:

- Fließgeschwindigkeit bis 5 mm/s
- Feststoffe - bis Teilchengröße 250 μm ,
- bis Härte 7 nach Mohs

Radien Bauform BA 3 und BA 5
- keine Probleme

Dichtstromförderung:

Radien $R = 250$ und $R = 500$
für Nennweiten DN 50 - DN 150

Kleiner Radien möglich !!

Faustregeln:



Rohrbogen DN 100, $R=195, 90^\circ$



Probleme beim höheren Temperaturen

Keramische Rohrleitungen ohne Panzerungen - kaum noch üblich

Keramiken - überwiegend geringer Wärmedehnung als Metalle

- bis 250 °C auch bei massiver Zementkittung keine Probleme
- bei höheren Temperaturen  unterschiedliche Längendehnung und unterschiedliches Streckverhalten beachten !
- gleichzeitige Wärmeisolierung oft gewünscht und hilfreich
- maximale Einsatztemperatur kein Problem !
- Thermoschock beachten :



Al_2O_3	120 K
SiSiC	500 K
Si3N4	600 K

Bei langsamer Erwärmung / Abkühlung können die Temperaturunterschiede ein Mehrfaches dieser Werte betragen.

Anwendungsbeispiele



Rohrbogen DN 50 PN16 R 1000
für eine α - Glips - Anlage



Komplett keramisch ausgekleidetes
Rohrsystem DN 50 - DN 80 PN 16 in
Asche-Transportsystem im Kraftwerk



Anwendungsbeispiele



Verteilerbox DN 125 PN 40
im Flüssigtransport von Rückstandssalzen



Keramischer und defekter metallischer
Einlaufkrümmer DN 40 nach gleicher
Einsatzzeit von 6 Monaten

