

### 4.3 Keramische Werkstoffe im Umfeld von mechanischer Belastung und Verschleiß

- Armin Kayser  
ESK Ceramics GmbH &Co. KG  
Kempten

*Die Folien finden Sie ab Seite 356.*

Zur Drucklegung des Buches war keine zusätzliche Ausarbeitung zum Vortrag verfügbar. Wir möchten Sie bitte, sich wegen Texten und Details direkt an den Autor zu wenden. Die Kontaktdaten sind:

Tel: 0831 / 5618 - 349

Fax: 0831 / 5618 – 8349

AKayser@esk.com

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 24) finden sich auf den folgenden Seiten.

# **Keramische Werkstoffe im Umfeld von mechanischer Belastung und Verschleiß**

Dipl.-Ing Armin Kayser  
ESK Ceramics GmbH & Co. KG  
Kempten



## Lösungen für komplexe Anforderungsprofile



## Reibung und Verschleiß

### Reibung und Verschleiß sind Systemeigenschaften

→ Tribologische Kennwerte müssen unter Beachtung **realer Betriebsbedingungen** gemessen und optimiert werden

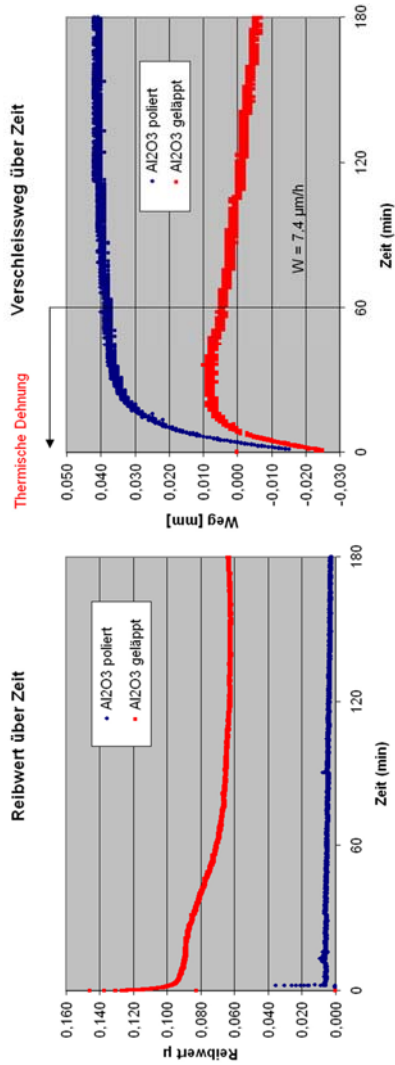
- Schmiermedium
- Druck
- Gleitgeschwindigkeit
- Gegenlaufkörper
- Oberfläche
- Kontaktbedingungen (Winkel, Geometrie,....)
- Elektrische Potenziale, Oberflächenladungen

## Beispiel Keramik/Polymer-Axiallager System

**Axiallagersystem:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gegen Tribopolymer:**

Schmiermedium Wasser 50 °C;  $p=0,5 \text{ MPa}$ ;  $v=1,9 \text{ m/s}$

$\text{Al}_2\text{O}_3$  Oberfläche verändert tribologische Eigenschaften drastisch



## Reibung



### Reibung = Verlust mechanischer Energie bei Relativbewegung

Wesentlicher Einfluss auf Effizienz in Motoren und Pumpen  
„Ökodesign-Richtlinie“ (2009/125 EG) verpflichtet Hersteller und Anwender zu optimalen Lösungen

Pumpen (Industrie+Haushalt) verbrauchen in EU derzeit ca. 259 TWh/a  
Einsparpotenzial durch optimierte Pumpen bis 2020: 135 TWh/a  
(Entspricht Jahres-Strombedarf von Schweden)

*Quelle: Grundfos*



Keramikbasierte Tribosysteme ermöglichen kosteneffiziente Lösungen

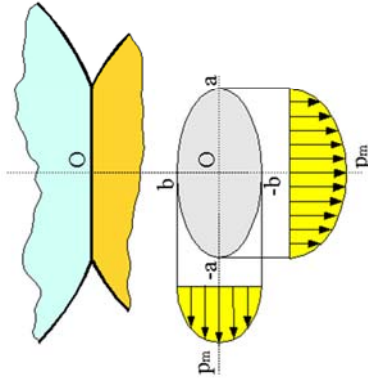
## Verschleiß

### Charakteristika von Keramik in Verschleißanwendungen:

- Hoher Einfluss von Werkstoffqualität u. Oberfläche (Porosität, Rauheit, Topographie)
- Hoher Einfluss von Verschleißart und Kontaktbedingungen
- Meist hoher Widerstand gegen Eigenverschleiß (Härte)
- Hoher Verschleiß am Tribokontakt möglich (Schleifscheibe!)
- ➔ Gute Eignung für offene Systeme (Bsp. Fadenführer, Düsen)
- Gute Eignung z. B. bei Fretting od. Gleitverschleiß
- Hervorragende Eignung im flüssig geschmierter Gleitkontakt

## Sonderfall: Wälzlager

### Hertzische Pressung im Wälzkontakt



- Für Werkstoffe mit hohem E-Modul ergeben sich hohe Belastungen
- Werkstoffe mit geringem E-Modul aber hoher Festigkeit und Zähigkeit bevorzugt ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{ZrO}_2$ )
- Anwendung: Hybridkugellager mit  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Wälzkörper

### Kontakt Zylinder-Zylinder

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{F \cdot E}{2\pi r l (1 - \nu^2)}}$$

Quelle: Wikipedia



## Abrasionsverschleiß zwischen Körpern



2 Körper-Abrasion durch harte Gegenflächen

- SiC/Grafit Paarung in Gleitringdichtung



3 Körper- Abrasion durch Abrasivpartikel

- Bandtrocknung in Papierherstellung (Sände)

- Gleitringdichtung in Wasserpumpen od. Ölförderung

- Keramische Werkstoffe sind i.d.R. beste technische Lösung
- Verschleiß i.d.R nicht mehr als Höhen-Abtrag messbar
- Härte von z. B. SiC höher wie alle natürlich vorkommenden Abrasivpartikel (Ausnahme Diamant)
- Begrenzung nur bei Trockenlauf oder Korrosionsmechanismen

## Erosion/Abrasion durch Partikel in Medien



### Verschleißrate abhängig von Geschwindigkeit und Aufprallwinkel



- Bei flachen Winkeln exzellente Beständigkeit
- Verschleißwiderstand nimmt mit Härte stark zu
- Härte muss min. 20% höher sein als Partikel

→ Beispiel: Strahldüsen aus  $Al_2O_3$ ,  $B_4C$



- Steile Winkel können ungünstig sein
- Probleme bei hoher kinet. Energie (Stoßverschleiß)
- Elastische Werkstoffe können besser geeignet

→ Mühlenauskleidungen aus Polyurethan oder Keramik

## Kosteneinsparung bei Betriebsmitteln



### Sandstrahldüse für Einsatz mit 1 mm Stahlkorund

Wolframkarbid:

Kosten 50 EUR/St., Standzeit 50 h

→ Kosten 1 EUR/Betriebsstunde

Borkarbid ( $B_4C$ ):

Kosten 90 EUR/St., Standzeit 150 h

→ Kosten 0,60 EUR/Betriebsstunde

→ ROI nach 100 Betriebsstunden

(ohne Berücksichtigung der Anlagen-  
verfügbarkeit und Wartungskosten)

## Stoßverschleiß

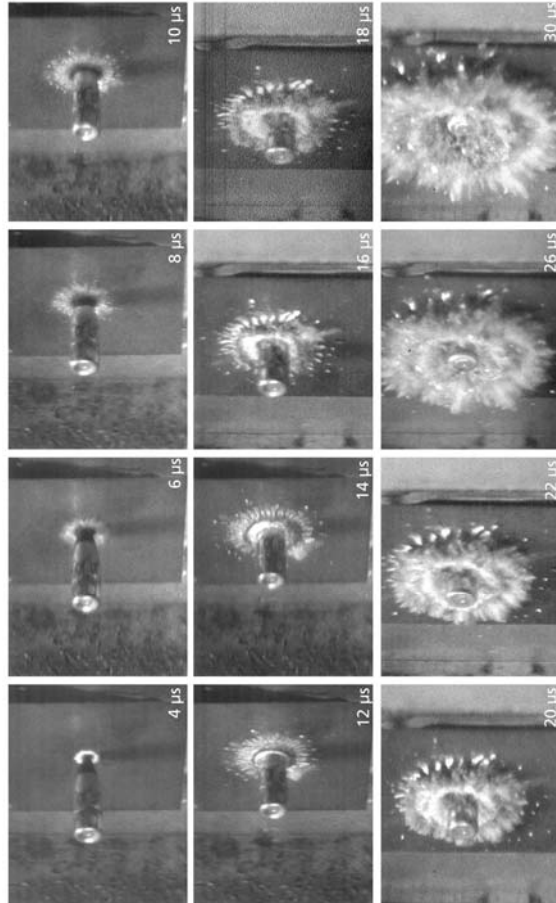


Ursache: Stoßbelastung unter steilem Winkel mit hoher Energie

Verschleißmechanismus:  
Bildung von Oberflächenrissen

- Keramik für **Dauerbelastung** eher ungeeignet
- Exzellente Eignung von Keramik mit hohem E-Modul bei **nicht wiederholender Belastung**:
  - Zerstörung von Projektil durch Stosswelle
  - Abbau von kinetischer Energie durch Rissbildung
  - Personenschutzsysteme, Fahrzeugpanzerungen

## „Stoßverschleiß“ durch Militärmunition



Quelle: **Fraunhofer**  
EMI

Plattenwerkstoff: B<sub>4</sub>C (HP) 8 mm, Munition 7,62 mm AP, v=850 m/s

## Adhäsionsverschleiß



Ursache: Materialübertrag auf Gegenfläche,  
v. a. bei hoher Temperatur und/oder hoher Druck

- Kann z. B. durch Schlupf an schnell rotierenden Wälzkontakten auftreten
  - Vermeidung durch Paarungen mit unterschiedlichen Werkstoffen und Härten
  - Vermeidung durch Wälzelemente geringer Trägheit (Dichte) z. B.  $\text{Si}_3\text{N}_4$
- Keramische Druckrollen (z. B.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) gegen Stahl

## Kavitationsverschleiß



Ursache: Druckimplosionen durch Gase in Flüssigkeiten

→ Lokal hohe Druckbelastungen führen bei keramischen Werkstoffen oft zum Versagen

Beispiel: B<sub>4</sub>C Düsen für Hochdruck-Wasserstrahlschneiden nicht geeignet

Hochzähe Werkstoffe sind besser geeignet (binderfreies Hartmetall)

## Fretting



Ursache: Reibverschleiß durch Vibration mit kleiner Amplitude oft in Zusammenhang mit Korrosions- und Temperaturbelastung

- Kann durch Keramik-Stahlpaarung oft zuverlässig vermieden werden
- Beispiel:  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Druckrollen
- Geringe Trägheit von  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Kugeln oder Rollen reduziert die tribologische Belastung durch Vermeidung von Schlupf



## Ermüdungsverschleiß und Oberflächenzerrüttung

Ursache:

Wechselnde Mechanische Belastung z.B. unter mechanischen Schwingungen

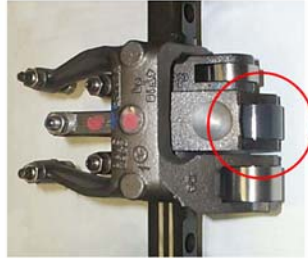
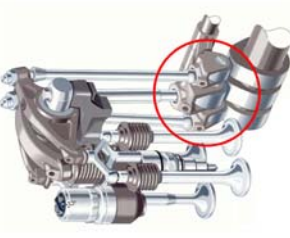


Verschleißmechanismus:  
Bildung von Oberflächenrissen

- Kann oft konstruktiv vermieden werden
- Konstruktive Optimierung durch z. B. FEM hat bei keramischen Werkstoffen erhöhte Bedeutung
- Ursachen sind hohe Spannungskonzentrationen aufgrund hohem E-Modul

→ **Einfache FEM Simulation löst Problem oft zuverlässig**

## Beispiel komplexer Verschleißbelastung



### Druckrollen für Einspritzpumpen

#### Besondere Anforderungen:

- Hohe Hertzische Pressung
- Mangelschmierung unter hohem Druck (> 2.000 bar)
- Hohe Dynamik (Schlupf!)

#### Typische Verschleißmechanismen:

- **Abrasion** durch Partikel
- **Adhäsion** durch Gleiten statt Rollen
- **Fretting** durch Schwingungen

## Beispiel komplexer Verschleißbelastung



### Druckrollen für Einspritzpumpen

#### Lösungsweg:

- Tribo-Paarung Stahl/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>
- Ballige Ausführung der Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Rollen für keramikgerechte Belastung
- optimierte Oberflächenbearbeitung der Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Rollen

#### Kundennutzen:

- Ausfallraten von > 5% auf << 1% reduziert
- Kein Re-Engineering erforderlich
- Höhere Druckniveaus ermöglicht (>1.600 bar)



## Beispiel Cross Industry Innovation



### Erosionsverschleiß bei Öl- und Gasförderung:

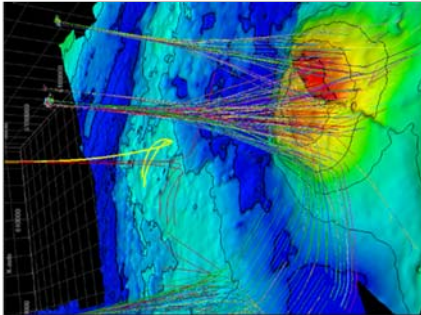
- kurze Standzeit von Stahlsieben
- Erosion durch Sandfracht in neuen Lagerstätten
- hohe Wechselkosten und Förderausfall

→ Hohe Motivation der Betreiber für optimierte Lösung

→ Grundidee: Nutzung von SiC Keramik

Austausch von Stahlsieben durch Keramiksiebe oder -filter wurde von Ölgesellschaft patentiert.

Konstruktive Umsetzung für komplexes Anforderungsprofil in Vergangenheit nicht möglich.



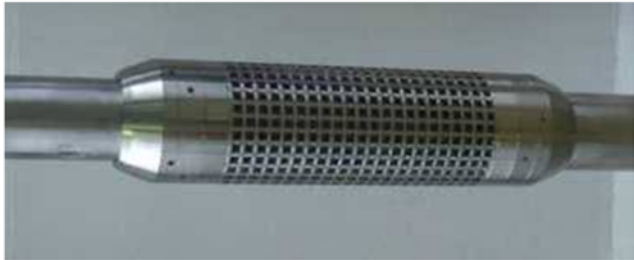
## Beispiel Cross Industry Innovation

### Konstruktive Lösung (pat.):

- Ringspaltsiebe aus dichten SiC Scheiben
- Konstruktive Vermeidung von Biegebelastungen
- Anpassung auf komplexes Belastungsprofil

### Ergebnis:

- erfolgreicher Betrieb in off-shore Gasförderung
- erhöhte Förderrate im Betrieb
- Vermeidung von Förderunterbrechung
- ROI < 1 Woche!



## Plattenwärmetauscher aus SiC-Keramik



Stand der Technik:  
Plattenwerkstoffe

Stahl, Grafit, Tantal mit PTFE Dichtung

Nachteile:

- hohe Kosten (Tantal)
- geringe **Druckbelastbarkeit (6 bar)**
- geringe **Abrasionsbeständigkeit**
- begrenzte Korrosionsbeständigkeit
- begrenzte Wärmeübertragungsleistung
- geringe Temperaturbelastbarkeit

- ➔ Hohe Energieeinsparung in kritischen Anwendungen möglich
- ➔ leistungsspezifische Kostenvorteile zu konventionellen Lösungen

## Plattenwärmetauscher aus SiC-Keramik



### Hürden für Markteinführung:

- Wirtschaftliches Fertigungsverfahren
- Plattenabmessungen (max. 650 mm)
- Füge- und Dichtungstechnik
- Druckbehälterverordnung (97/23/EG)
- Konstruktive Auslegung
- CFD u. FEM Optimierung der Designs

### Realisierter Kundennutzen:

- Dauerbetrieb bei 1.000 °C
- Max. Druck 50 bar
- Kühlung hochabrasiver Keramiksuspensionen
- Einsatz in konzentrierten Laugen u. Säuren
- Mikroreakorttechnologie

## Keramik und Tribologie



### Vorteile in Tribo-Anwendungen:

- extreme Härte
- korrosionsstabil
- sehr gut Wärmeleitfähig
- geringe Dichte (dynamische Anwendungen)
- hohe Steifigkeit
- extreme Druckfestigkeit

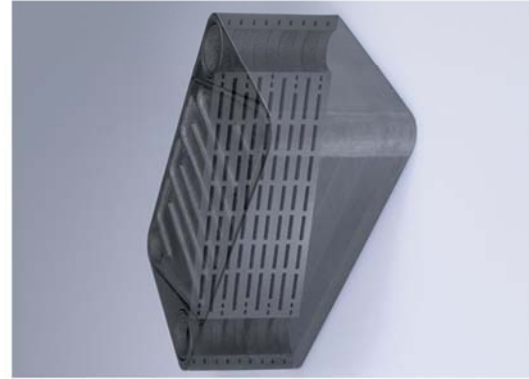
### Nachteile in Triboanwendungen:

- geringe Duktilität
- geringe Zugfestigkeit
- hohe Bearbeitungskosten
- Einschränkung bei Verbindungstechniken
- geringe Anwendungserfahrung
- eingeschränkte Trockenlauf Eigenschaften





## Keramik und Tribologie



### Technische Lösungsansätze:

- Keramikgerechtes Design
- Hybrid-Lösungen

### Systematische Lösungsansätze:

- Cross Industry Innovation
- Entwicklungspartnerschaft
- konsequente Nutzung optimaler Simulations- und Prüfmethoden (FEM, CFD, spezifische Tribotests)
- realistisches Target-Costing (Systembetrachtung!)