

C) Kosten sparen - durch Einsatz von Keramik

- Dr. Hans Hoppert,
ETEC Technische Keramik GmbH,
Siegburg

Die Folien finden Sie ab Seite 105.

1. Einleitung

Die Wirtschaftlichkeit von Produktionsanlagen wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- **Leistung, Durchsatz, Standzeit**
- **Investitionen**
- **Betriebskosten**
- **Wartungs- und Reparaturkosten**
- **Betriebsausfallkosten**

In den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Maschinen und Anlagen sind Instandhaltungskosten und vor allem Betriebsausfallkosten sehr entscheidende, vielleicht die wichtigsten Parameter.

Verschleiß und Korrosion sind die wichtigsten Ausfallursachen

2. Keramische Werkstoffe für den Verschleißschutz

Keramische Werkstoffe ermöglichen wirtschaftliche Problemlösung im Verschleiß – und Korrosionsschutz. Im Maschinen – und Anlagenbau ist Keramik oft die einzige Lösung, um die Forderungen nach ausreichenden Standzeiten bei hohen Durchsätzen zu erfüllen. Das Anwendungspotential der Keramik ist groß. Es wird leider heute nur noch zu wenig ausgenutzt. Vorreiter beim Einsatz von Keramik war die Stahlindustrie.

Im Pumpenbau sind keramische Lager – und Dichtelemente heute nicht mehr wegzudenken. Bergbau und Energietechnik haben in den letzten Jahren deutlich aufgeholt. Ein weiterer breiter Anwendungsbereich ist die Aufbereitungstechnik – vor allem von mineralischen Rohstoffen -, und die Fördertechnik zum Transportieren von Massenschüttgütern.

Die folgenden Beispiele zeigen Beispiele für die Zerstörung von Stahlbauteile durch Verschleiß

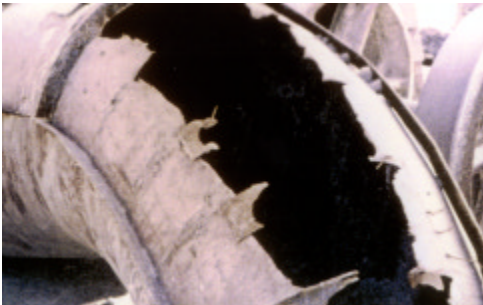


Bild 1: Verschlissener Rohrbogen



Bild 2: Ventilatorgehäuse

Speziell im Verschleiß – und Korrosionsschutz erreichte die Keramik in den letzten Jahren eine bedeutende Marktstellung. Ihre spezifischen Eigenschaften – wie z. B. hohe Härte, hohe Bruchfestigkeit, hohe Formbeständigkeit, bedingt durch ihren hohen Elastizitätsmodul, und niedriges spezifisches Gewicht sind die Voraussetzungen für ihren Einsatz in vielen Bereichen des Maschinen – und Anlagenbaus. Neben den im Blickpunkt stehenden Anwendungen in der Luft – und Raumfahrt, in der Energietechnik und der überschätzten Anwendung im Verbrennungsmotor hat die Keramik heute, in vielen weniger spektakulären Bereichen ihre Überlegenheit gegenüber Metallen und Polymeren bewiesen.

Die Härte ist die wichtigste Werkstoffeigenschaft, die eine hohe Verschleißfestigkeit garantiert.

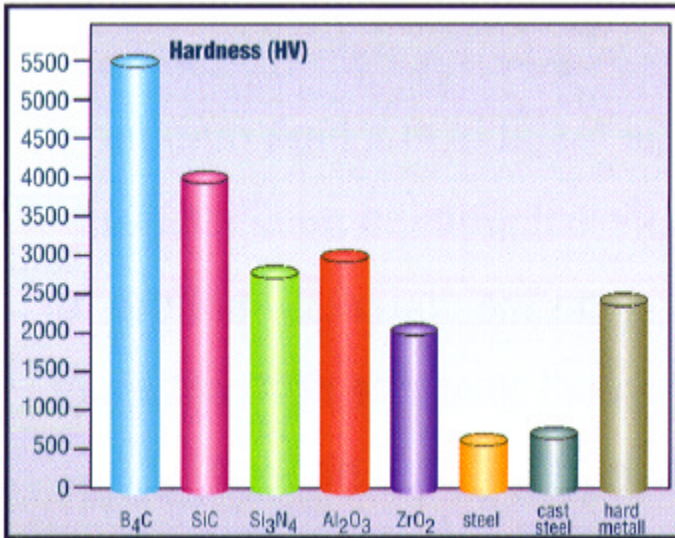


Bild 3: Werkstoffvergleich: Härte (HV 10)

Warum ist eine hohe Härte so wichtig im Verschleißschutz?

Ist die Härte des Verschleißschutzwerkstoffes höher als die Härte des zu verarbeitenden Materials, arbeitet das Tribosystem in der Verschleißtieflage. Der Verschleiß ist gering, die zu transportierenden Partikel können nicht in die Oberfläche des Verschleißschutzmaterials eindringen. Durch das Gleiten der Partikel über die Oberfläche können keine Riefen und Furchen auf der Oberfläche des Auskleidungswerkstoffes erzeugt werden. Erreicht oder überschreitet die Härte des Abrasivstoffs die Härte der Auskleidung, dann dringen die Partikel tief in die Oberfläche des belasteten Werkstoffes ein. Der Verschleiß liegt nun in der Hochlage, der Werkstoff wird spannend belastet.

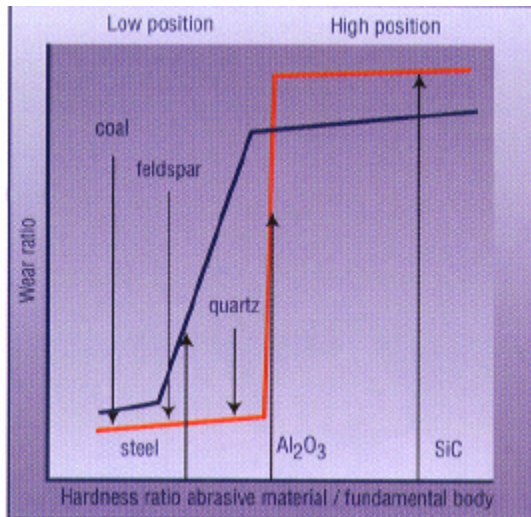


Bild 4: Vergleich: Hoch-/Tieflage Charakteristik bei Stahl und bei Keramik

Im Prinzip lassen sich diese Betrachtungen auf die altbewährte Härte-skala von Mohs zurückführen

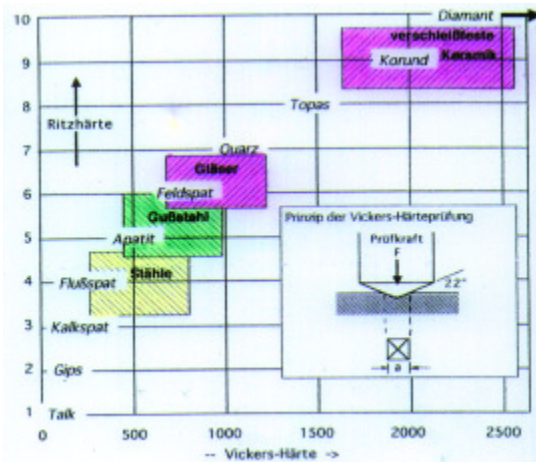


Bild 5: Härteskala von Mohs

Bei ETEC wurde schon 1985 der Strahlverschleißtest zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit und zum Vergleich von unterschiedlichen Werkstoffen bzw. Werkstoffqualitäten eingeführt. Der Aufbau der Anlage und eine Zusammenfassung der Ergebnisse von unterschiedlichen Verschleißschutzwerkstoffen sind in den folgenden Bildern dargestellt.

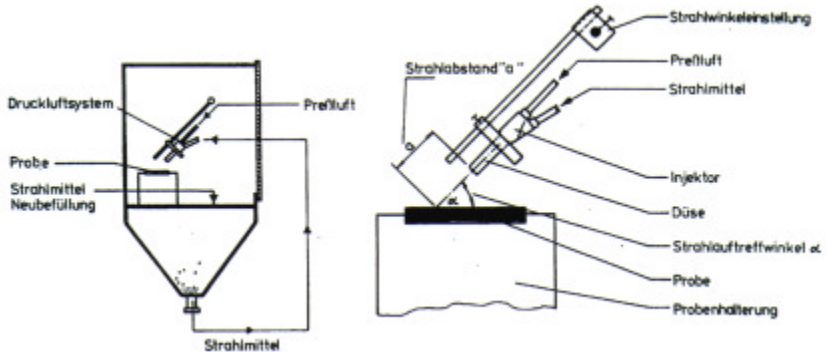


Bild 6: Anlage zur Bestimmung des Strahlverschleißes nach DIN 50332 (ETEC Standard)

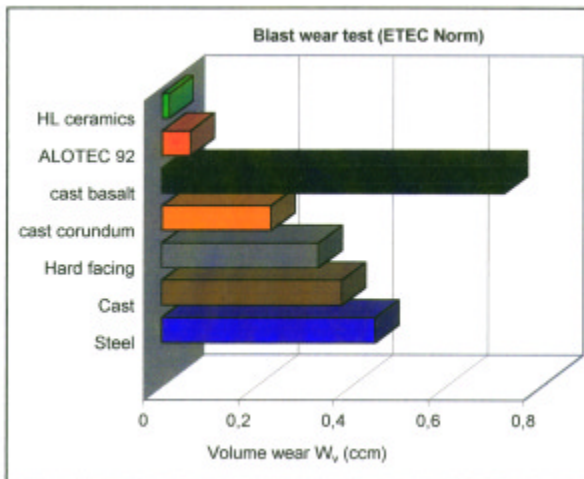


Bild 7: Volumenverschleiß von Verschleißschutzwerkstoffen

Nicht nur bei der Untersuchung von unterschiedlichen Werkstoffgruppen findet man deutliche Unterschiede im Verschleißverhalten, auch verschiedene Werkstoffqualitäten können sich deutlich im Verschleißverhalten unterscheiden.

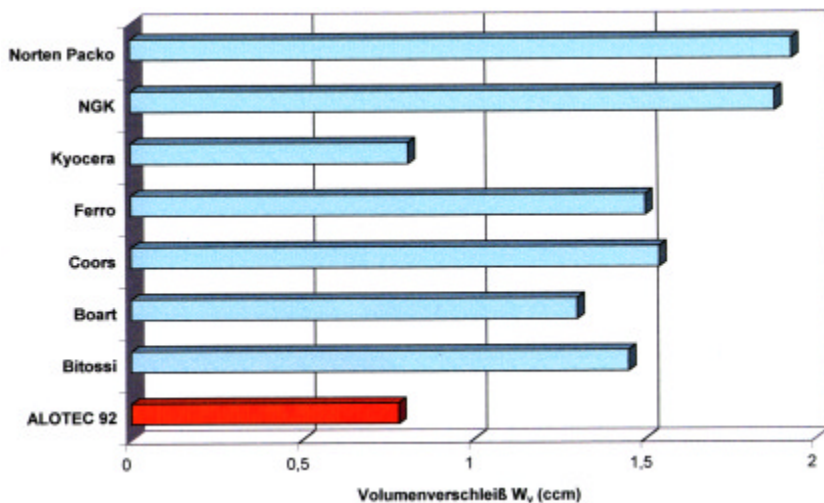


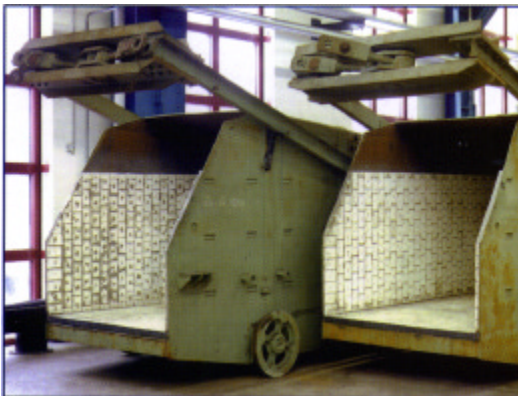
Bild 8: Verschleißfestigkeit von Aluminiumoxidkeramik (92%) verschiedener Hersteller

Im weiten Bereich der heute verfügbaren keramischen Konstruktionswerkstoffe (Siliziumcarbid, Siliziumnitrid, Borcarbid, Zirkoniumoxid, Aluminiumoxid u. a.) hat heute noch die Aluminiumoxid – Keramik den weitaus größten Marktanteil. Ursachen hierfür sind ihre in der Gesamtheit recht guten physikalischen Eigenschaften, vor allem aber ihr nicht zu unterbietendes Preis/Leistungs – Verhältnis. Hier ist allerdings auch zu berücksichtigen, dass die heutigen Werkstoffe durch Optimierung der Versätze und der Fertigungstechnologie nicht mehr mit den Materialien früherer Jahre zu vergleichen sind.

3. Anwendung von Keramik

Heute stellt die Keramik bei extrem beanspruchten Maschinen – und Anlagenteilen eine unverzichtbare tribotechnische Lösung dar. Obwohl die Lösungen mit Keramik in den meisten Fällen teurer sind als die konventionellen auf Stahl – oder Polymerbasis, rechnet sich die Keramik entgegen der landläufigen Meinung in jedem Fall für den Anwender durch ihre Gebrauchsvorteile. Bei der heute üblichen und aus wirtschaftlichen Gründen erforderlichen hohen Prozessgeschwindigkeit ist häufig Keramik die einzige Alternative.

Dafür einige Beispiele:



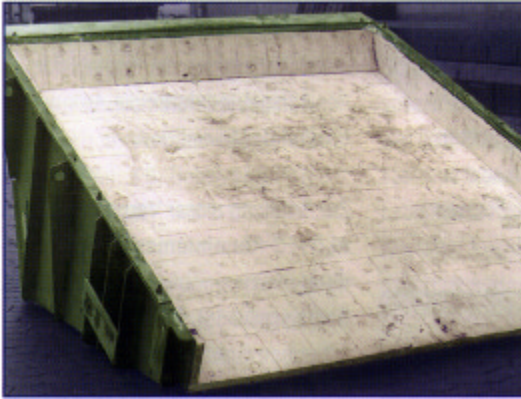
Stahllösung:
Standzeit < 1 Jahr

Keramiklösung:
Standzeit > 5 Jahre

Kosten:
Stahl / Keramik: 1/2

Auskleidungsstärke:
50 mm

Bild 9:Förderhunte zum Beschicken von Hochöfen



Stahllösung:
Standzeit 0,5 Jahre

Keramiklösung:
Standzeit 6 bis 7 Jahre

Kosten:
Stahl / Keramik: 1/1,5

Auskleidungsstärke:
20 mm

Bild 10: Schwingförderrinne zum Transport von heißem Hüttenkoks



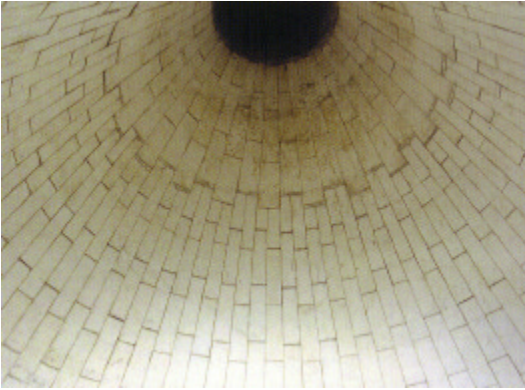
Stahllösung:
Standzeit 2 Jahre

Keramiklösung:
Standzeit > 10 Jahre

Kosten:
Stahl / Keramik: 1/2

Auskleidungsstärke:
30 mm

Bild 11: Übergabetrichter in einem Stahlwerk



Stahllösung:
Standzeit < 1 Jahr

Keramiklösung:
Standzeit > 10 Jahre

Kosten:
Stahl : Keramik ~1:2,5

Auskleidungsstärke:
15 mm

Bild 12: Hochtemperaturzyklon in einer Müllverbrennungsanlage



Schmelzbasalt:
Standzeit < 1 Jahr

Keramiklösung:
Standzeit > 5 Jahre

Kosten:
Basalt : Keramik ~1:1,5

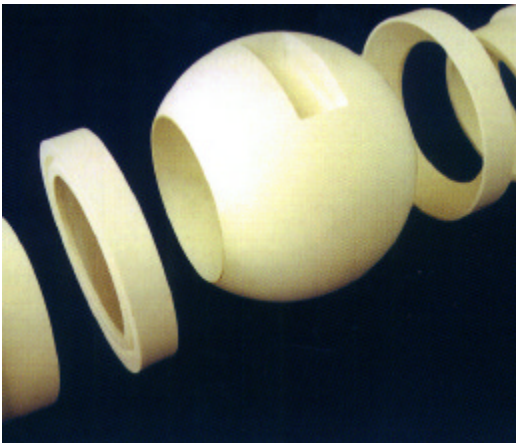
Auskleidungsstärke:
12 mm

Bild 13: Rohrbogen zum pneumatischen Transport von Asche in einem Braunkohlekraftwerk



Ni-Hard:
Standzeit 28 Tage
Keramik:
Standzeit 100 Tage
Kosten:
Ni-Hard : Keramik ~1:2

Bild 14: Laufwerk für Schlammpumpe zum Fördern von Andalusit



Standzeitvergleiche sind bei Kugelhähnen wegen ihrer Medien – und Strömungs – Abhängigkeit schwer möglich, allerdings wurden Standzeiterhöhungen von > 50 erreicht

Kosten:
Metall : Keramik ~ 1:10

Bild 15: Kugelhähne

Diese Beispiele können nur einen kleinen Bereich über den Stand der Technik und über das mögliche Kosteneinsparungs – Potential beim Einsatz von keramischen Werkstoffen vermittelt. Nicht zu vergessen ist, dass für viele Keramikmaterialien Korrosion kein Problem darstellt. Im Allgemeinen ist Keramik extrem korrosionsfest: Allerdings gibt es auch hier Unterschiede zwischen den einzelnen Werkstoffgruppen und Werkstoffqualitäten. Sie sind aber deutlich weniger ausgeprägt als z.B. bei den Metallen.

Ein Nachteil der keramischen Festigungstechnologie besteht darin, dass keine großformatigen Bauteile hergestellt werden können. Man ist deshalb auf die Verwendung von Fügeverfahren angewiesen. Fügeverfahren besitzen aber auch Vorteile. Diese Werkstoffverbunde – die wichtigsten sind Keramik/Stahl, Keramik/Polymere, Keramik/ Keramik – haben die Aufgabe die Eigenschaften der Einzelwerkstoffe so zu kombinieren, dass sie nicht versagenskritisch werden. Das wichtigste und am häufigsten angewandte Verbundsystem ist das System Keramik/Stahl. Bei den oben diskutierten Anwendungen bestimmt die Stahlkomponente die Konstruktion und wirkt als tragende Komponente. Die Keramik ist verantwortlich für die Funktion: Verschleiß – und Korrosionsschutz, Verringerung von Reibung und Adhäsion. Je nach den vorliegenden Belastungen – Prallbeanspruchung, Temperatur, nur um die wichtigsten zu nennen – stehen eine Reihe von erprobten Fügeverfahren zur Verfügung.

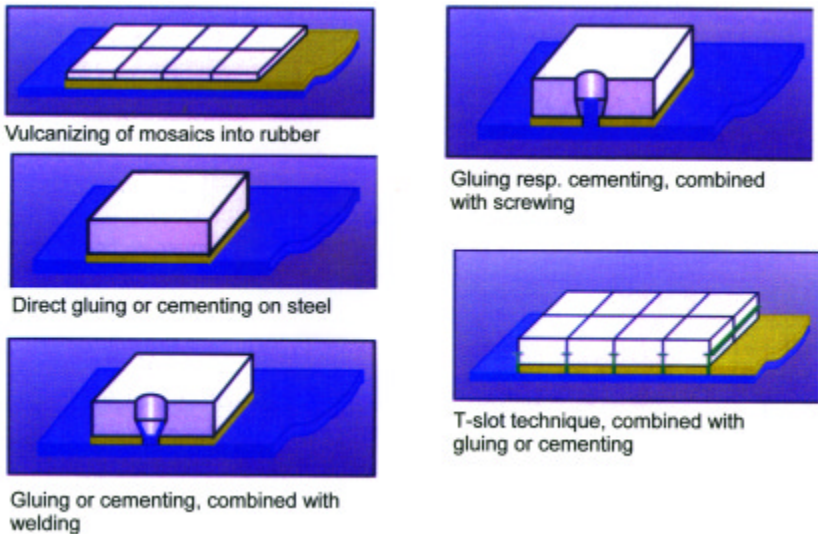


Bild 16: Montagetechnik für Auskleidung

Auf eine negative Eigenschaft der Keramik muss bei diesen Betrachtungen noch eingegangen werden. Keramik ist spröde und dadurch empfindlich gegen zu hohe Prall – oder Stoßbelastung. Verantwortlich hierfür ist der hohe Elastizitätsmodul im Vergleich zu den Metallen. Beim Design der Auskleidung oder der Bauteile kann dieser Nachteil durch eine keramikgerechte Konstruktion weitgehend ausgeglichen werden. Beispiele hierfür sind die oben beschriebenen Förderhunte oder Übergabetrichter. Durch die Erhöhung der Wandstärke der Platten und durch Verlegung in ein Kunststoffbett mit einer definierten Restelastizität, die einen Anteil der Prallenergie absorbiert, werden Schäden durch Prallverschleiß vermieden.

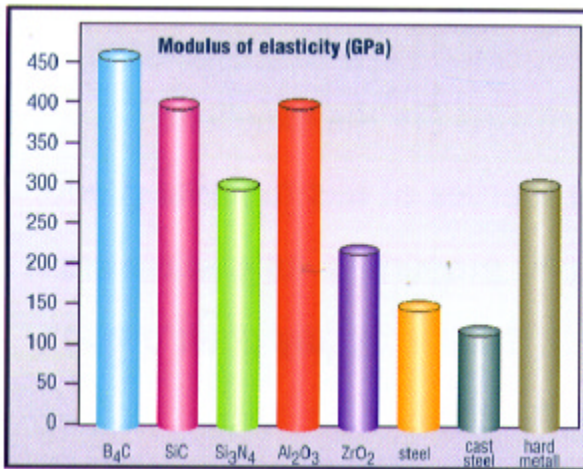


Bild 17: Werkstoffvergleich : E – Modul

Gegen extrem hohen Prallverschleiß schützen Impact panels – ein Keramik-Polyurethan Verbund. Hier wird die hohe elastische Verformbarkeit des Polymers zur Energieabsorbierung genutzt. Eine Anwendung finden die Impact panels in Übergabetrichtern von Gurtbandförderanlagen, wenn grobkörniges Stückgut vorliegt, z. B. bei Roherzen und Kies.

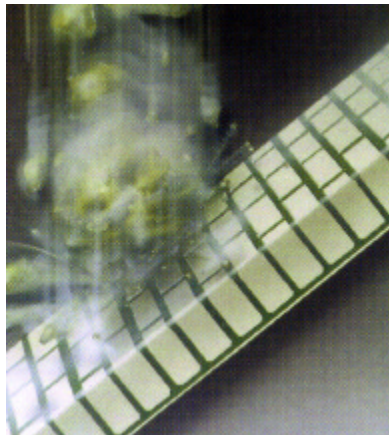


Bild 18: Impact panels

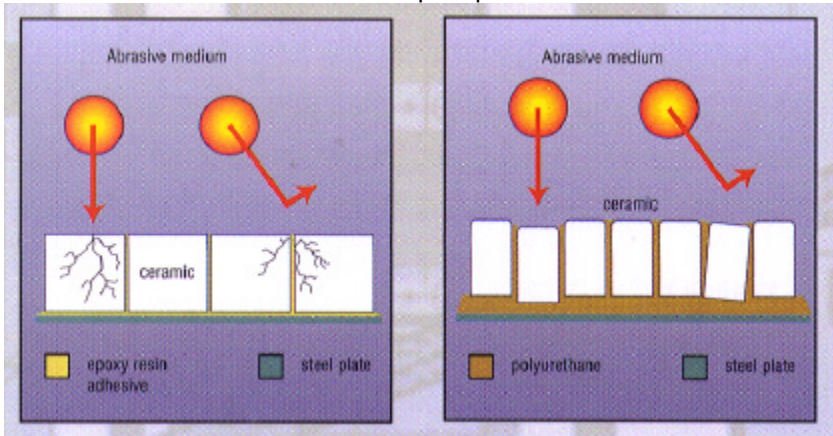


Bild 18: Impact panels – Aufbau und Prinzip

Als letztes Beispiel eines erfolgreichen Keramik/Polymer – Verbundes soll die Belegung der Antriebsrollen von Förderbändern kurz beschrieben werden. Ihre Vorteile liegen, bedingt durch die Noppenstruktur der Keramik, in der besseren Kraftübertragung von der Antriebsrolle auf das Band – auch bei Nässe und starker Verschmutzung. Der hohe Grip schützt das Förderband und vermeidet das Durchrutschen. Dieser Effekt verlängert deutlich die Lebensdauer der teuren Bänder.

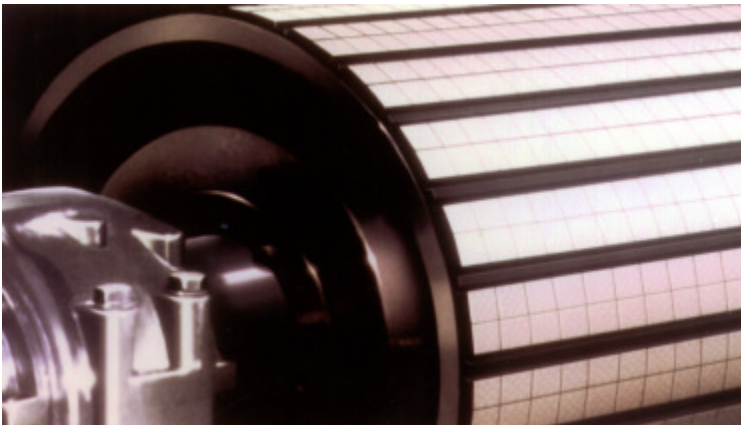


Bild 19: Antriebsrollen für Förderbänder, belegt mit Noppenkeramik

Vorteile der Noppenkeramik:

- Besserer Grip, auch bei Nässe – kein Rutschen des Bandes
- Energieeinsparung
- Gleichmäßiger Bandlauf
- Deutliche Verschleißsenkung an den Rollen und am Band, dadurch
- Deutliche Erhöhung der Lebens-Zyklus-Zeiten

4. Werkstoffe der Keramik

Im ersten Teil dieses Vortrags wurde ausschließlich über Erfahrungen mit Aluminiumoxid - Keramik berichtet. Der Grund hierfür ist, dass in unserem Hause überwiegend Oxidkeramik produziert wird.

Neben Aluminiumoxid gibt es noch eine Vielzahl von weiteren Hochleistungs - Werkstoffen. Die wichtigsten sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Bei der Anwendung aller Keramikwerkstoffe ist immer zu bedenken, dass es sich um mehr oder weniger spröde - elastische Materialien handelt. Die Sprödigkeit ist durch den Spannungssensitivitätsfaktor K_{Ic} definiert.

$K_{Ic} < 5$	$K_{Ic} 5 - 12$	Pseudoduktill
Al ₂ O ₃	ZTA	C - SiC
SiC	ZrO ₂	Langfaserverstärkung
Sialone	SN	Keramik - Metall-
B ₄ C		Composites (CMC)
Verbundwerkstoffe		

z.B. $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiC}$	
$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiC}$	

Bild 20: Einteilung der Werkstoffgruppen

Diese Einteilung der Werkstoffgruppen hat sich für eine Vorauswahl des für spezifische Anwendungen am besten geeigneten Materials bewährt. Auf die einzelnen Werkstoffklassen innerhalb einer Gruppe soll hier nicht eingegangen werden.

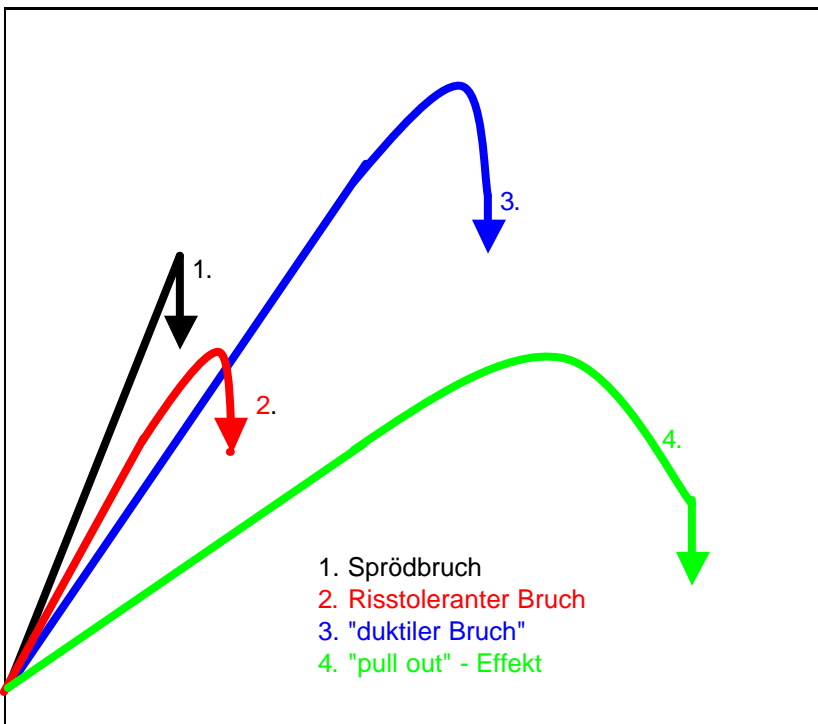


Bild 21: Bruchverhalten der Keramik

Das Verschleißverhalten von verschiedenen Keramikqualitäten ist in Bild 22 dargestellt. Die Verschleißbeträge wurden durch den Strahltest nach DIN 50332 bestimmt. Als Vergleichswert dient eine Aluminiumoxid – Keramik mit einem Al_2O_3 – Gehalt von 92%, die speziell für Anwendungen im Verschleißschutz entwickelt wurde.

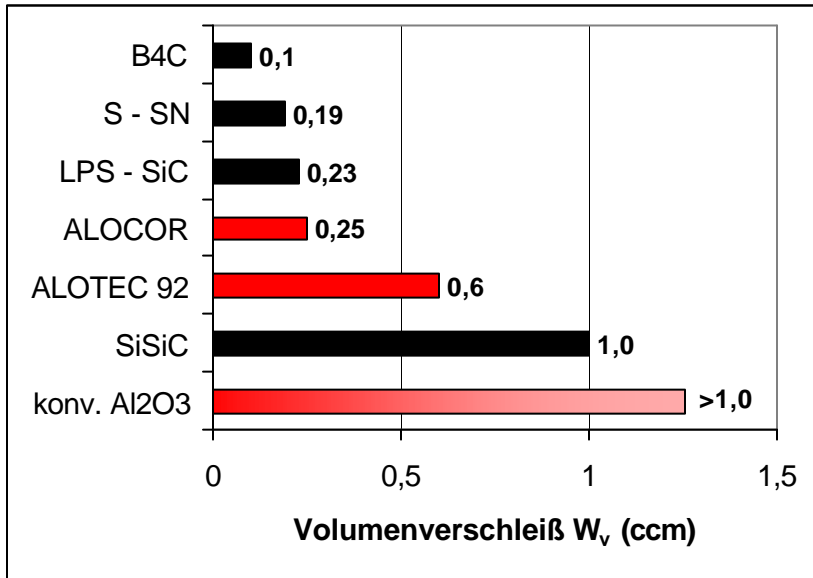


Bild 22: Verschleiß von Keramikwerkstoffen

Zum Schluss – um das breite Anwendungspotential der Keramik zu dokumentieren – werden in folgenden Bildern noch einige Beispiele von keramischen Bauteilen gezeigt und die für spezielle Anwendungen wichtigsten Eigenschaften diskutiert.

Anforderungsprofil:

- Hohe Festigkeit
- Hohe Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit
- Temperaturbeständigkeit
- Niedrige Sprödigkeit

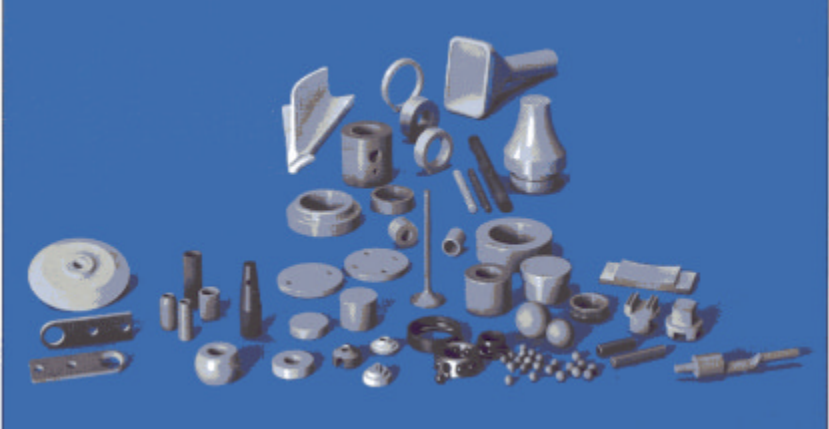


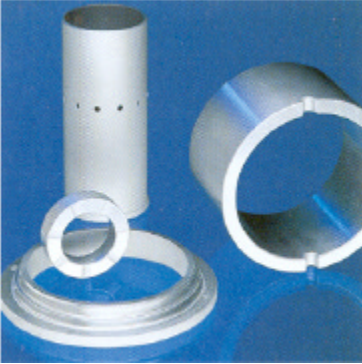
Bild 23: Keramikbauteile; **Werkstoffe:** SN, ZrO_2 , B_4C , SiC, Al_2O_3



Anforderungsprofil:

- Festigkeit
- Hohe Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit
- Temperaturwechselbeständigkeit

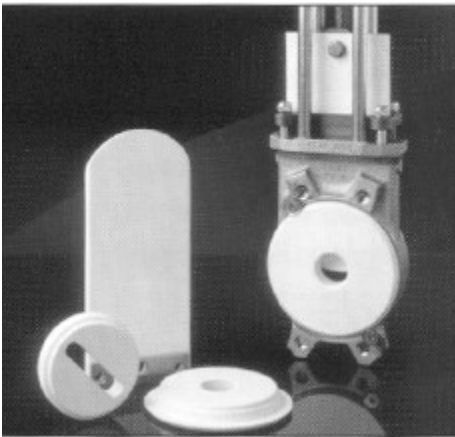
Bild 24: Keramikbauteile; **Werkstoffe: SiC, SN, ZrO₂, ZTA, (Al₂O₃)**



Anforderungsprofil:

- Festigkeit
- Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit
- Gute Gleiteigenschaften
- Hohe Wärmeleitfähigkeit

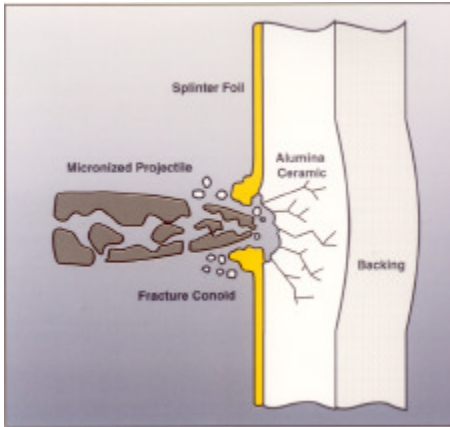
Bild 25: Keramikbauteile; **Werkstoffe: SiSiC, Al₂O₃, (SN), (LPS – SiC)**



Anforderungsprofil:

- Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit
- Festigkeit

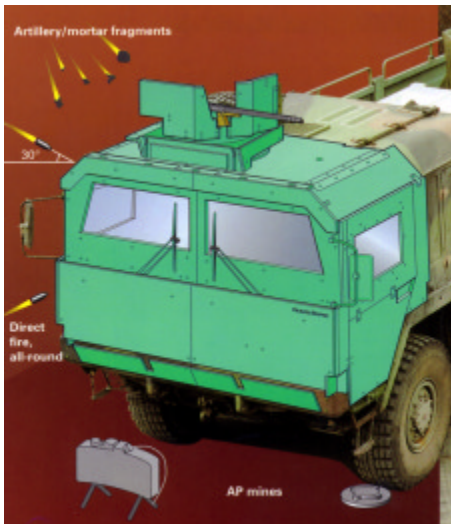
Bild 26: Schieberegler; **Werkstoffe: Al₂O₃, SiC, SN, ZrO₂**



Werkstoffe:

- Al_2O_3 3,77-3,98 g/cm^3
- BC 2,5 g/cm^3
- SiC 2,8 –3,2 g/cm^3
- (SN) 3,2 g/cm^3
- (ALN) 3,0 g/cm^3
- (BN) 2,2 g/cm^3

Bild 27: Ballistischer Schutz



Werkstoffanforderungen:

- Härte: >20GPa HV5
- E-Modul: >360 GPa
- Schallgeschwindigkeit: >10.000 m/s
- Dichte: 98% d. th. D.
- Toleranzen: < 0,3%
- Spaltbreite: < 0,2 mm
- Niedriges Flächengewicht

Bild 28: Ballistischer Schutz

5. Zusammenfassung

Heute gibt es eine Vielzahl von keramischen Werkstoffen und unzählige daraus gefertigte Bauteile, welche die Anforderungen im Maschinen- und Anlagenbau – auch unter extremen Betriebsbedingungen – in hervorragender Weise erfüllen.

Optimieren Sie die Leistung ihrer Anlagen!

Nutzen Sie die bewährte Qualität der Keramikprodukte!

Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung ist, dass die Bauteile **anwendungsgerecht entwickelt, keramikgerecht konstruiert** und **qualitätsgerecht produziert** werden. Machen Sie keine Alleingänge – sondern diskutieren Sie Ihre Probleme offen mit dem Keramikhersteller. Sie können sicher sein, dass Sie der VKI mit seinem IZTK und allen Mitgliedsfirmen hierbei voll unterstützen. Und bedenken Sie immer, dass nicht die Einzelkosten der Bauteile sondern ihre „life time cycle cost“ – um es neudeutsch auszudrücken – Ihre Produktionskosten bestimmen!

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 23) finden sich auf den folgenden Seiten.

think
ceramics

Werkstoffe, Eigenschaften und Anwendungen

Kosten sparen –
durch Einsatz von Keramik

Dr. Hans Hoppert
ETEC Gesellschaft für Technische Keramik mbH
Siegburg



Gliederung

think
ceramics

1. Warum Keramik?
2. Keramische Werkstoffe im Verschleißschutz
3. Beispiele für den erfolgreichen Einsatz von Keramik
4. Keramik – Verbundsysteme
5. Werkstoffe der Keramik
6. Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz von Keramik



Folie 2

Wirtschaftlichkeit von Produktionsanlagen

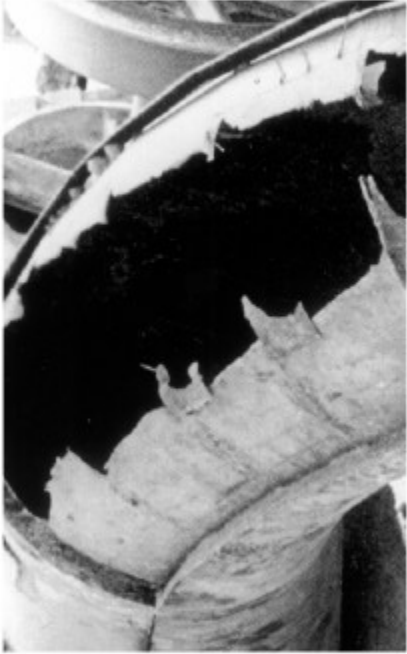
think
ceramics

- Leistung, Durchsatz, Standzeit
- Investitionen
- Betriebskosten
- Wartungs- und Reparaturkosten
- Betriebsausfallkosten



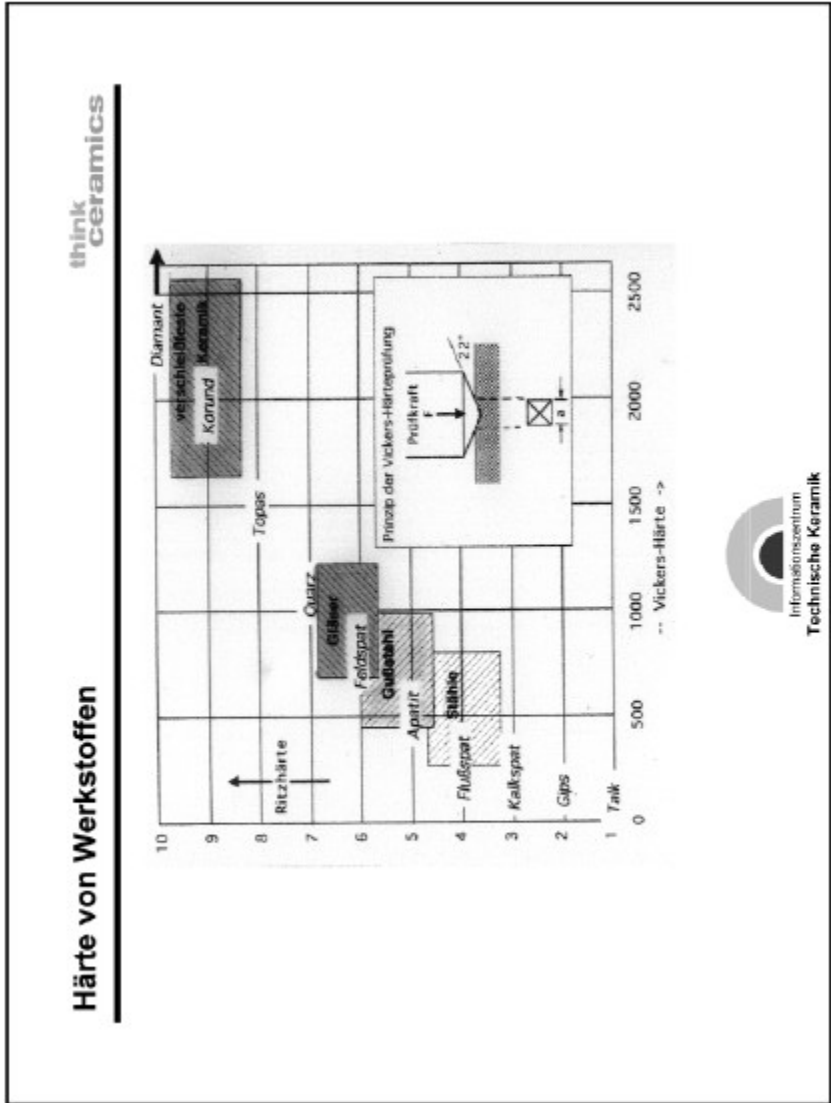
Verschlissener Rohrbogen

think
ceramics

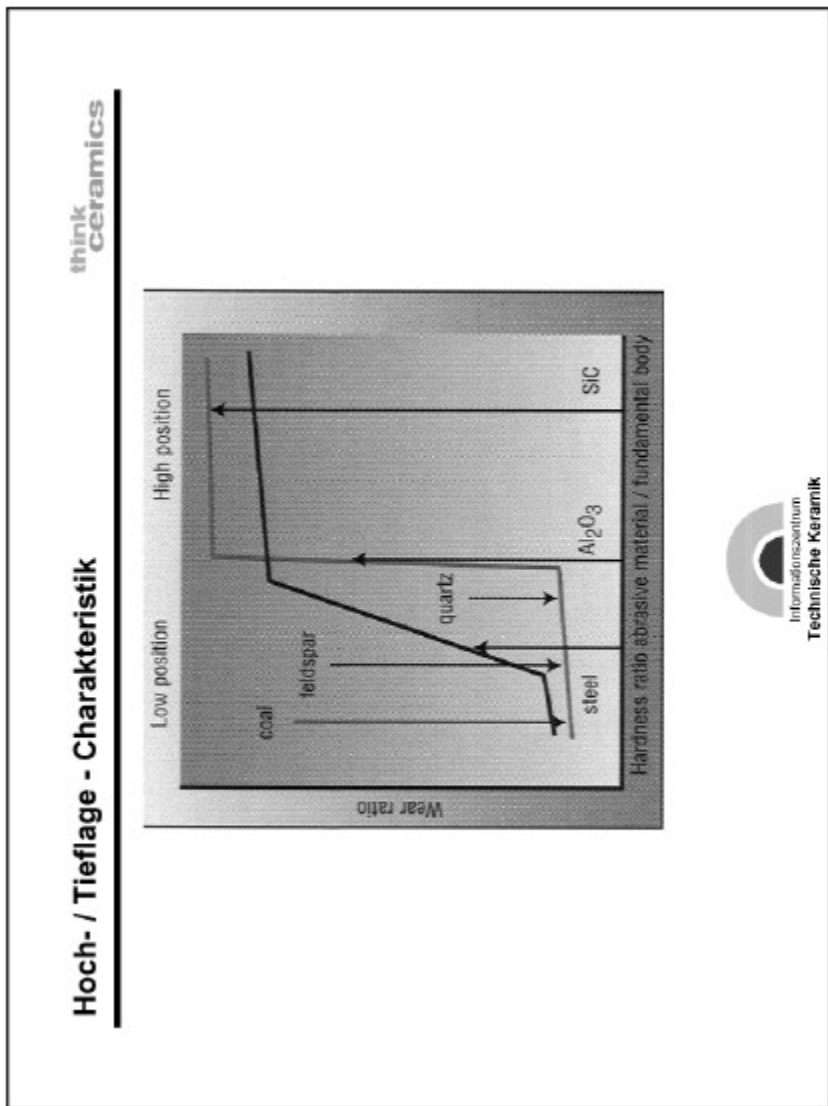


Informationszentrum
Technische Keramik

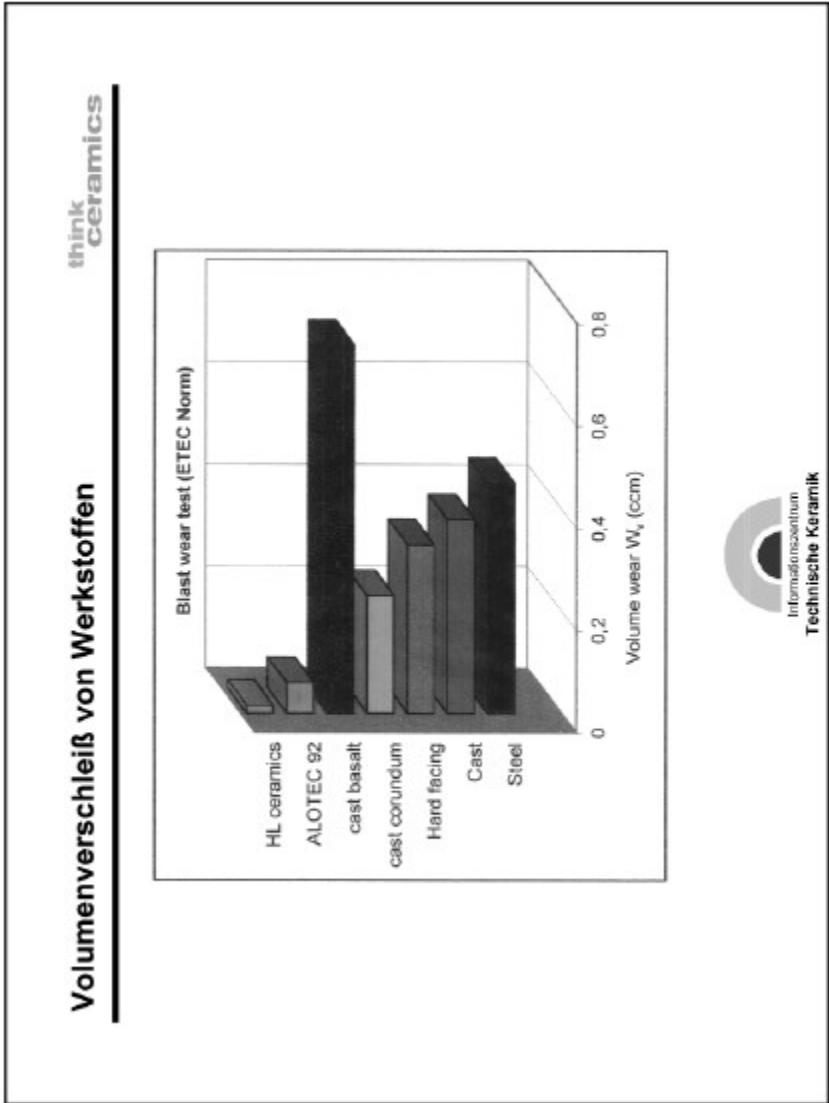
Folie 4



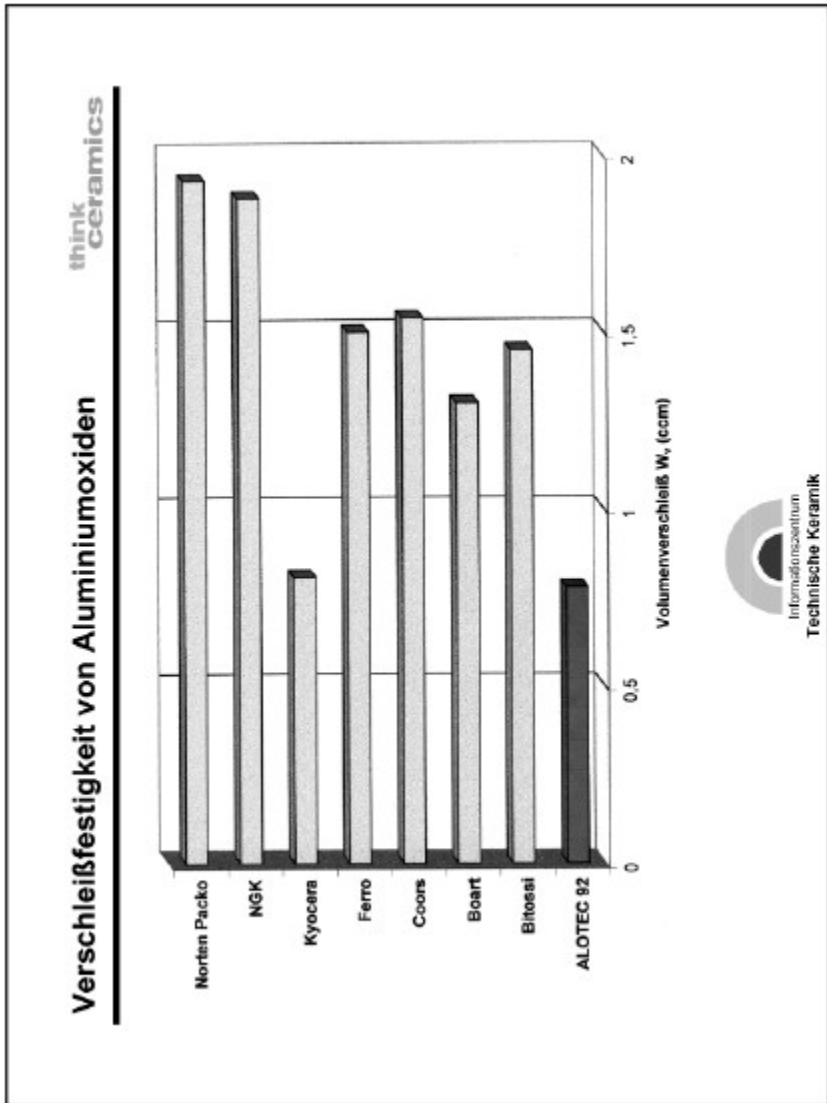
Folie 5



Folie 6



Folie 7



Folie 8

Übergabetrichter in einem Stahlwerk

think
ceramics

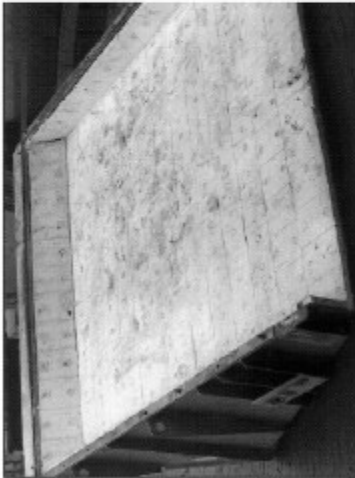


Vergleich:

- **Stahllösung:**
Standzeit 2 Jahre
- **Keramiklösung:**
Standzeit > 10 Jahre
- **Kosten:**
Stahl / Keramik: 1/2
- **Auskleidungsstärke:**
30 mm

Schwingförderrinne

think
ceramics



Vergleich:

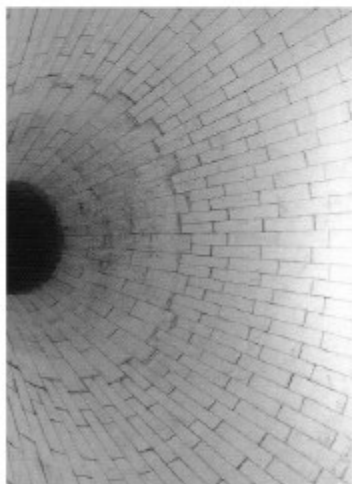
- Stahlösung:
Standzeit 0,5 Jahre
- Keramiklösung:
Standzeit 6 bis 7 Jahre
- Kosten:
Stahl / Keramik: 1/1,5
- Auskleidungsstärke:
20 mm



Folie 10

Hochtemperaturzyklon

think
ceramics

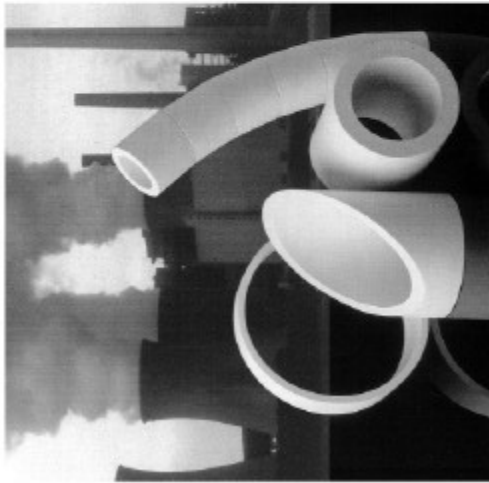


Vergleich:

- **Stahllösung:**
Standzeit < 1 Jahr
- **Keramiklösung:**
Standzeit > 10 Jahre
- **Kosten:**
Stahl / Keramik: ~1:2,5
- **Auskleidungsstärke:**
15 mm

Rohrbogen zum Transport von Asche

think
ceramics



Vergleich:

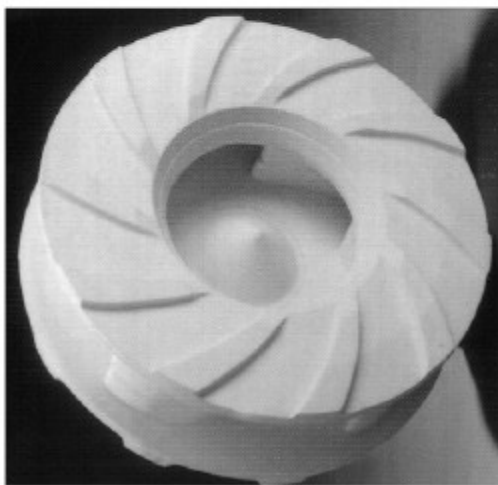
- Schmelzbasalt :
Standzeit < 1 Jahr
- Keramiklösung:
Standzeit > 5 Jahre
- Kosten:
Basalt / Keramik: ~1:1,5
- Auskleidungsstärke:
12 mm

Informationszentrum
Technische Keramik

Folie 12

Laufrad für Schlickerpumpe

think
ceramics

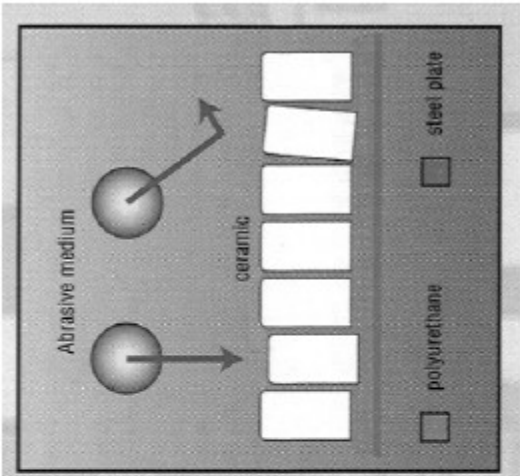


Vergleich:

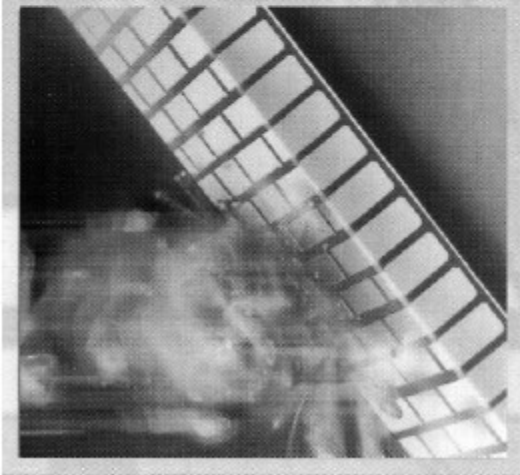
- Ni-Hard : Standzeit 28 Tage
- Keramiklösung: Standzeit 100 Tage
- Kosten: Ni-Hard : Keramik ~1:2

Impact panels – Aufbau und Prinzip

think ceramics



The diagram illustrates the cross-section of an impact panel. It consists of several layers: a top layer of 'Abrasive medium' (represented by two spheres), a middle layer of 'ceramic' (represented by five rectangular blocks), a layer of 'polyurethane' (represented by a thin layer), and a bottom 'steel plate' (represented by a thin layer). Arrows point from the 'Abrasive medium' and 'ceramic' labels to their respective layers. Below the diagram, there are two checkboxes: one for 'polyurethane' and one for 'steel plate', both of which are currently unchecked.



The photograph shows a curved impact panel being tested. A large impact is visible, causing a significant amount of debris to be ejected from the panel. The panel is supported by a grid structure.

Informationszentrum
Technische Keramik

Folie 14

Antriebsrollen für Förderbänder

think
ceramics




Vorteile durch Noppenkeramik:

- Besserer Grip
- Energieeinsparung
- Gleichmäßiger Bandlauf
- Deutliche geringer Verschleiß
- Deutliche Erhöhung der Lebens-Zyklus-Zeiten

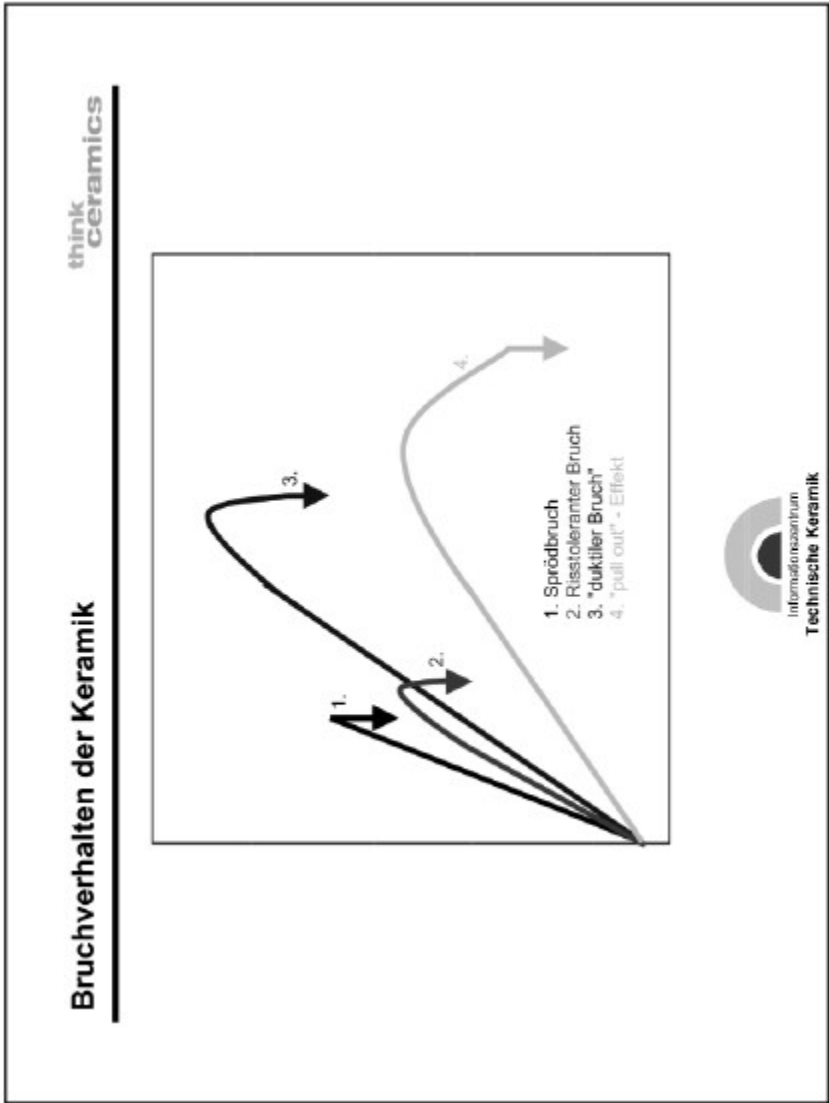
think
Ceramics

K _{Ic} < 5	K _{Ic} 5 - 12	Pseudoduktill
<p>Al₂O₃</p> <p>SiC</p> <p>Sialone</p> <p>B₄C</p> <p>Verbundwerkstoffe z.B. Al₂O₃ / SiC</p> <p>Al₂O₃ / TiC</p>	<p>ZTA</p> <p>ZrO₂</p> <p>SN</p>	<p>C - SiC</p> <p>Langfaserverstärkung</p> <p>Keramik - Metall-Composites (CMC)</p>



Informationszentrum
Technische Keramik

Folie 16



Folie 17

Keramikbauteile

think
ceramics



Anforderungsprofil:

- Festigkeit
- Hohe Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit
- Temperaturwechselbeständigkeit

Werkstoffe: SiC, SiN, ZrO₂, ZTA, (Al₂O₃)



Keramikbauteile

think
ceramics



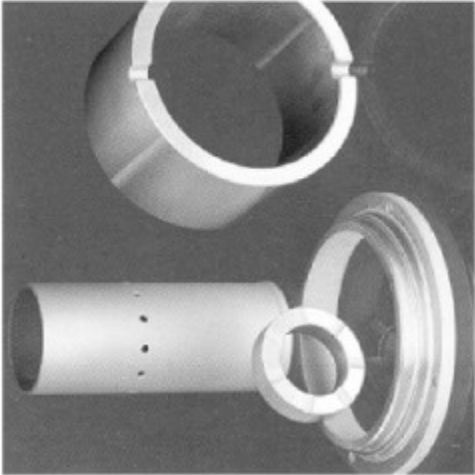
Anforderungsprofil:

- Festigkeit
- Hohe Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit
- Temperaturwechselbeständigkeit

Werkstoffe: SiC, SiN, ZrO₂, ZTA, (Al₂O₃)

Keramikbauteile

think
ceramics



Anforderungsprofil:

- Festigkeit
- Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit
- Gute Gleiteigenschaften
- Hohe Wärmeleitfähigkeit

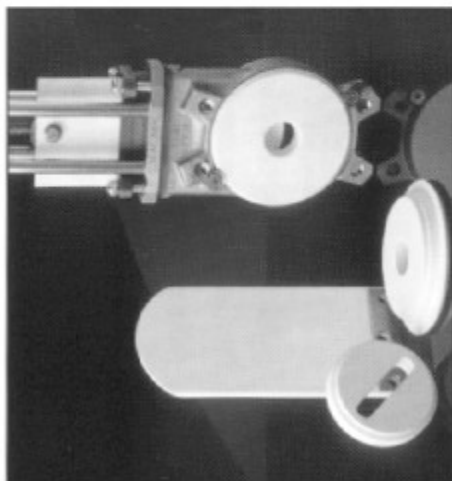
Werkstoffe: SiC, Al₂O₃, (SiN), (LPS – SiC)

Informationszentrum
Technische Keramik

Folie 20

Schieberegler

think
ceramics



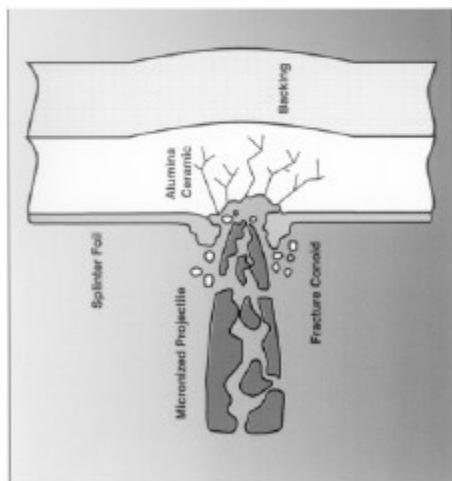
Anforderungsprofil:

- Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit
- Festigkeit

Werkstoffe: Al_2O_3 , SiC , SiN , ZrO_2

Ballistischer Schutz, Prinzip

think
ceramics



Werkstoffe:

- Al_2O_3 3,77-3,98 g/cm³
- BC 2,5 g/cm³
- SiC 2,8 -3,2 g/cm³
- (SN) 3,2 g/cm³
- (ALN) 3,0 g/cm³
- (BN) 2,2 g/cm³

Ballistischer Schutz

think
ceramics



Werkstoffanforderungen:

- Härte: >20GPa HV5
- E-Modul: >360 GPa
- Schallgeschw.: >10.000 m/s
- Dichte: 98% d. th. D.
- Toleranzen: < 0,3%
- Spaltbreite: < 0,2 mm
- Niedriges Flächengewicht