

## 3. Hochtemperaturtechnik

### 3.1 Auswahl von Hochtemperaturwerkstoffen

- Dr. Kirsten Wilm  
W. Haldenwanger Technische Keramik GmbH & Co. KG  
Waldkraiburg

*Die Folien finden Sie ab Seite 290.*

#### 3.1.1. Einleitung

Die Auswahl des richtigen Werkstoffes im Bereich der Hochtemperaturanwendungen stellt häufig Nicht-Keramiker und selbst Keramiker vor eine schwierige Entscheidung. Die physikalischen Eigenschaften der verschiedenen Materialien geben nicht immer einen eindeutigen Hinweis auf die Haltbarkeit des Materials in den vielfältigen Anwendungen. Viele Kriterien sind zu berücksichtigen und manches mal macht erst der Versuch klug.

#### 3.1.2. Materialauswahl

Die Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Materials ist die Kenntnis über die geforderten Materialkenndaten. Darunter fallen die physikalischen, chemischen und thermischen Eigenschaften eines Werkstoffes.

Um "unliebsamen" Überraschungen vorzubeugen, müssen die genauen Einsatzbedingungen bekannt sein. In der Tabelle (siehe Folien) sind keramische Werkstoffe (dichte und poröse) und ihre physikalischen Daten zusammengefasst. Ein Beispiel aus der Praxis zeigt, wie wichtig es ist, sich vorher über die Einsatzbedingungen im Klaren zu sein. Ein Kunde hat ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Schutzrohr bestellt und nach kurzer Zeit im Einsatz festgestellt und reklamiert, dass sich das Rohr deformiert hat. Die Einsatztemperatur sei dabei unterhalb der in der Tabelle angegebenen maximalen Einsatztemperatur gewesen. Eine Untersuchung des Rohres zeigte, dass das Rohr durch Strömungen im Einsatzbereich unterschiedlich stark aufgelöst wurde.

Bereits gesammelte Erfahrungen können helfen, ein geeignetes Material auszuwählen.

Die Zielsetzung beinhaltet, was das Material im Besonderen können muss. Es gibt keinen Werkstoff, der universell einsetzbar ist. Besitzt eine sehr gute Temperaturwechselbeständigkeit (TWB), so ist er meist nicht gasdicht. Soll er Wärme leiten oder besser isolieren, soll er elektrisch leitend sein, oder ist es wichtig, dass er bei hohen Temperaturen große Lasten tragen kann, oder sollte er chemisch beständig sein? Die Einsatzgebiete von Hochtemperaturwerkstoffen sind so vielseitig wie ihre Zusammensetzungen. Ob als Isolierrohrchen, Laborporzellan, Schutzrohre, Transportrollen (z.B. im Fliesenofen), Brennhilfsmittel, Schmelztiegel oder...

So wie Stahl nicht gleich Stahl ist, gleicht keine Aluminiumoxidkeramik einer anderen. Einen wichtigen Faktor stellt der Gehalt an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dar. Mit zunehmendem Gehalt (von  $< 90\%$  -  $\rightarrow 99\%$ ) steigen Dichte, Biegefestigkeit, Elastizitätsmodul, Durchschlagsfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Die maximale Einsatztemperatur erhöht sich und die chemische Beständigkeit wird weiter verbessert. Weiterhin gibt es poröse  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Keramiken. Durch die erhöhte Porosität wird eine deutlich bessere TWB erzielt, dabei steigt die Wasseraufnahmefähigkeit und sinkt die Biegefestigkeit.

### 3.1.3. Beanspruchung

#### 3.1.3.1. Temperatur

Um die Beanspruchungen einschätzen und ein Material auswählen zu können, sind Informationen über die maximale Einsatztemperatur und die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit notwendig. Welchen Temperaturschocks (Delta-Temperatur und Zeitraum) die Keramik ausgesetzt wird und wie vielen Zyklen (Aufheizen und Abkühlen) sie standhalten soll, stellen ebenfalls Beanspruchungen dar. Des Weiteren hat die Haltezeit einen Einfluss auf die Lebensdauer des Werkstoffes.

Durch steigende Energiekosten befindet sich die Brenntechnologie im stetigen Wandel. Um die Effektivität der Öfen zu steigern, also Brennkosten zu senken, wurden neue Öfen mit kürzeren Durchlaufzeiten entwickelt. Der kalt/kalt Zyklus in einem Tunnelofen beträgt knapp 40 h, in einem Kammerofen etwas über 20 h und in einem Rollenofen nur noch 2 h. Inzwischen gibt es Rollenöfen für die Herstellung von

Fliesen die einen kalt/kalt Zyklus von nur 32 min haben. Mit 5 Öfen werden jeden Tag 120.000 m<sup>3</sup> Fliesen hergestellt.

Brennhilfsmittel, wie z. B. Tellerständer, halten etwa 3.000 Brennzyklen stand, bevor sie ausgetauscht werden müssen und das bei Einsatztemperaturen von 1.400 °C und einem kalt/kalt Zyklus von 5-7 h.

### **3.1.3.2. Atmosphäre**

Welche Atmosphäre herrscht in dem Einsatzbereich? Handelt es sich um eine oxidierende oder reduzierende Atmosphäre? Wie ist die Zusammensetzung und welche Korrosiven Bestandteile sind enthalten?

### **3.1.3.3. Kontak**

Mit welchem Material wird die Keramik im Einsatz in Berührung kommen und welchen Aggregatzustand hat dieses Material? Gibt es starke Strömungsgeschwindigkeiten (siehe oben)? Diese Informationen sind entscheidend für die Auswahl der Keramik.

### **3.1.3.4. Mechanische Belastung**

Wichtig für die Auslegung eines Bauteils ist festzustellen, ob eine Druck-, Biege-, Zug- oder Torsionsbelastung vorliegt. Ebenso ist zu klären, ob das Material abriebfest sein sollte.

Eine weitere wichtige Rolle spielt der Belastungszustand. Handelt es sich um eine Punktlast oder um eine Flächenlast. Bei Schutzrohren für Thermoelemente ist es wichtig zu wissen, ob sie vertikal oder horizontal in den Ofen eingebaut werden.

Werden verschiedene Materialien in einem Bauteil kombiniert, so kann es zu ungewollten mechanischen Belastungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten der einzelnen Materialien kommen.

### 3.1.4. Bauteilgeometrie, Abmessungen und Toleranzen

Wie Metalle können auch Keramiken in den verschiedensten Abmessungen angefertigt werden. Im Gegensatz zu der Herstellung von Metallen erfolgt bei der Keramik die Formgebung vor dem Erhitzen. Während des Brennens schwindet das Material auf das Endmaß. Eine Nachbearbeitung ist möglich, aber sehr kostenintensiv. Schwankungen in den Abmessungen sind nicht nur durch den Fertigungsprozess möglich, sondern auch dadurch, dass Keramik aus natürlichen Rohstoffen besteht. Um enge Toleranzen einhalten zu können, werden höchste Anforderungen an den Herstellprozess, die Trocknung und die Brenntechnik gestellt. Für verschiedene Abmessungen von sehr klein (Außendurchmesser = 0,5 mm, Innendurchmesser = 0,15 mm) bis sehr groß (AD = 330 mm, ID = 310 mm) ist der Herstellprozess, die Trocknung und die Brenntechnik individuell anzupassen.

Die Oberflächengüte ist abhängig vom Material und einer eventuellen Endbearbeitung. Quarzgutrollen werden vor dem Einsatz im Glas-Temperofen geschliffen, um die erforderliche Oberflächenrauigkeit von  $\sim 2\mu\text{m}$  zu erzielen.

### 3.1.5. Anforderungen an keramische Bauteile

Jedes Jahr werden technologische Fortschritte erzielt. Neue Technologien, aber auch Kostendruck und Preiskampf, stellen wachsende Anforderungen an Werkstoffe und Bauteile. Dadurch steigen auch die Anforderungen, die an technische Keramiken gestellt werden:

- Einsatz bei Temperaturen von 600°C bis 1.650°C
- Support und Transport von immer höheren Lasten
- Last und Temperatur in Kombination
- Verbesserte Temperaturwechselbeständigkeit
- Hohe chemische Resistenz
- Geeignetes Benetzungsverhalten
- Engere Toleranzen

Für:

- Höhere Lebensdauer
- Niedrigere Energiekosten

- Niedrigere Betriebskosten (Rationalisierung)
- Reduzierung der Durchlaufzeiten (Schnellbrand)

### 3.1.6. Praxisbeispiele

#### 3.1.6.1. Materialauswahl für Rollenöfen

Rollenöfen werden für die verschiedensten Brenngüter verwendet. Je nach Brenngut wird eine entsprechende Einsatztemperatur mit unterschiedlichen Lasten und Lastweiten verlangt.

Die Einsatztemperatur von Quarzgutrollen ist auf 1.000°C beschränkt. Für das Tempern von Flachglas ist diese Temperatur ausreichend. Entscheidend für den Einsatz ist die Oberflächengüte und die geringen Wechselwirkungen mit dem Material, um Reaktionen während des Tempervorganges zu vermeiden. Quarzgutrollen besitzen so gut wie keine thermische Ausdehnung und haben dadurch eine sehr gute TWB.

Um für jedes Brenngut den idealen Rollenwerkstoff zu verwenden, werden stets neue Rollenwerkstoffe entwickelt:

- Corundum Mullite Rollen zeichnen sich aus durch eine gute TWB und geringe Kriechneigung bei Temperaturen bis 1.550 °C
- Corundum Zirconia Rollen besitzen eine hohe chemische Resistenz, die einen Einsatz in Metallhärteöfen ermöglicht. Ein direkter Kontakt zu Na<sub>2</sub>O-haltigen Schmelzen ist möglich. Grundsätzlich gilt für oxidische Rohre, dass mit steigender Last die Rotationsgeschwindigkeit erhöht werden sollte, um ein Durchbiegen der Rollen zu vermeiden.
- Corundum Zirconia Mullite (CZM) Rollen haben eine sehr hohe TWB. Sie werden in Hochtemperaturöfen eingesetzt. Durch die hohe TWB ist es sogar möglich, die Rollen während des Ofenbetriebes im heißen Zustand zu wechseln. Ohne den Ofen anzuhalten und abzukühlen, wird Zeit und Energie gespart. Weiterhin haben sie eine geringe Korrosionsneigung bei einer maximalen Anwendungstemperatur von 1.600 °C.

### 3.1.6.2. Heißlager in Rollenöfen

Rollenöfen werden immer breiter und mit steigender Lastweite (Spannweite) muss ein qualitativ höheres Rollenmaterial eingesetzt werden. Zum Beispiel um schwere Sanitärkeramik zu brennen, werden überwiegend SiC-Rollen eingesetzt. Die Kriechneigung von nicht-oxidischen Keramiken ist geringer als die von oxidischen. Um Kosten zu senken, wurde ein Versuch gestartet, ein Rollenlager innerhalb des Ofens einzubauen. Bisher ist die Lagerung der Rollen außerhalb der Ofenausmauerung. Durch die Verlegung in den heißen Ofenraum ist ein Lager aus Metall nicht mehr zu verwenden. Mit dem als Rollenwerkstoff erprobtem SiC-Material wurde ein keramisches Heißlager konstruiert.

### 3.1.6.3. Brennhilfsmittel (Aufhängung) im Deckenförderofen (DFO)

Um die keramischen Rollen kostengünstig herstellen zu können, wurde ein Ofen entwickelt, in dem die Rohre an eine Deckenkonstruktion gehängt und so in den Ofen eingefahren werden. Hierdurch wird eine optimale Ausnutzung des Ofenraumes erzielt und der Einsatz von Brennhilfsmitteln auf ein Minimum reduziert. Der so genannte Deckenförderofen (DFO) hat bei einem Volumen von  $85 \text{ m}^3$  eine Brenngut-Tonnage von bis zu 18 t! Die maximale Brenntemperatur liegt bei  $1.600 \text{ }^\circ\text{C}$  und der Brennzyklus kalt/kalt ist kleiner 72 h.

Die Aufhängung aus rekristallisiertem und dotiertem Siliciumcarbid hat neben der für SiC Werkstoffe typischen Eigenschaften wie hohe Formstabilität, sehr gute TWB (aufgrund geringer Wärmeausdehnung und hoher Wärmeleitfähigkeit), sehr hohe Verschleißfestigkeit, extrem hohe Korrosionsbeständigkeit und geringem spezifischem Gewicht, eine sehr gute Oxidationsbeständigkeit und kann bis zu Temperaturen von  $1.650 \text{ }^\circ\text{C}$  eingesetzt werden.

Damit ist dieser Werkstoff in der Lage, den enormen Zugbelastungen von 2.500 Rollen und bei gleichzeitiger Belastung durch Wärmespannungen (im Ofen  $1.600 \text{ }^\circ\text{C}$  und außerhalb der Ofenausmauerung ca. Raumtemperatur) standzuhalten, obwohl die Aufhängung nur ein Bruchteil von dem wiegt, was sie trägt.

### **3.1.7. Schlussbetrachtung**

Steigende Anforderungen können durch Werkstoffentwicklungen, konstruktive Lösungen sowie eine Kombination aus Werkstoff und Konstruktion erfüllt werden.

Die Voraussetzung für einen Kosten-Nutzen-optimierten Einsatz von Keramik ist die enge partnerschaftliche Zusammenarbeit von Keramikhersteller und Anlagenbauer bzw. Anlagenbetreiber.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 22) finden sich auf den folgenden Seiten.

# Hochtemperaturtechnik

## Auswahl von Hochtemperaturwerkstoffen

Dr. Kirsten Wilm  
W. Haldenwanger Technische Keramik GmbH & Co. KG  
Waldkraiburg



## Materialauswahl

### Geforderte Materialkennndaten

- o Physikalisch
- o Chemisch
- o Thermisch



## **Erfahrungen**

---

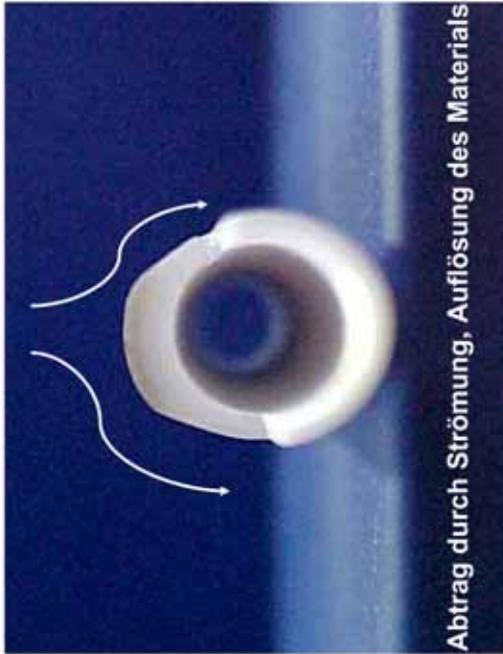


- Ist bereits ein Produkt im Einsatz?
- Welche Probleme sind mit dem Material aufgetreten?
- Was soll durch das neue Material verbessert werden?

**Erfahrungen Praxisbeispiel**



**Kunden-Reklamation:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Rohr ist durch Einsatz deformiert!**



**Abtrag durch Strömung, Auflösung des Materials**

3.1. Hochtemperaturwerkstoffe Folie 5

## **Zielsetzung**

### **Was soll das Material bzw. Bauteil können**

- o Wärme (isolieren/leiten)
- o Elektrisch isolieren
- o Gase (trennen, führen, umschließen)
- o Flüssigkeiten (trennen, führen, umschließen)
- o Festkörper (trennen, führen, umschließen)
- o Gasdichtigkeit erforderlich
- o Abrasionsschutz
- o Lasten tragen/transportieren



## Beanspruchung

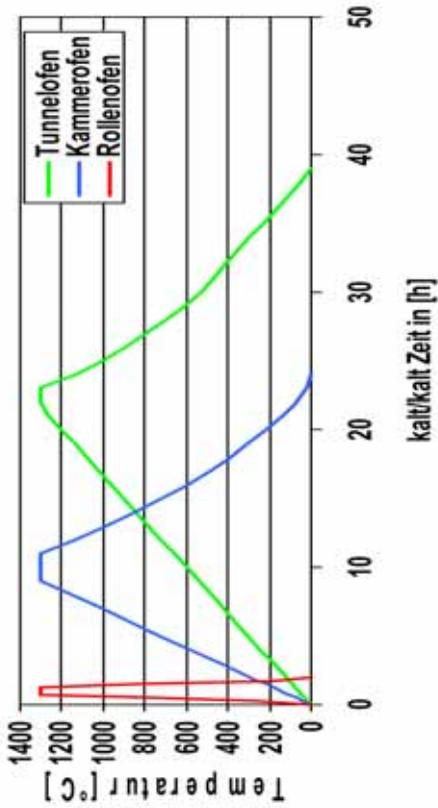
- **Temperatur**
  - o Maximale Temperatur
  - o Delta Temperatur (Temperaturwechsel)
  - o Haltezeit
  - o Zyklendauer (kalt/kalt)
- **Atmosphäre**
  - o Oxidierend/reduzierend
  - o Zusammensetzung der Atmosphäre
  - o Korrosive Bestandteile (Dämpfe, Gase, Stäube, ...)
- **Kontakt**
  - o Festkörper
  - o Flüssigkeit
  - o Gas

## Brenntechnologie



### Steigende Effektivität

– Brennzeiten (Durchlaufzeiten), Energiekosten



## Brennhilfsmittel / Brenngestelle



3.1. Hochtemperaturwerkstoffe Folie 10

## Mechanische Belastung



### Mechanische Belastung

- Druck
- Biegung
- Zug
- Torsion
- Abrieb

### Belastungszustand

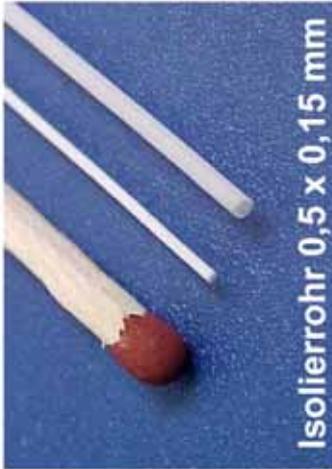
- Punktlast
- Streckenlast (Lastweite)
- Lastpositionierung
- Vertikaler Einbau
- Horizontaler Einbau

## **Bauteilgeometrie**

### **Toleranzen**

- o DIN 40680
- o DIN ISO 2768
- o Entsprechend Vorgaben
- o Durchbiegung
- o Planizität
- o TIR
- o Oberflächengüte (-rauigkeit)
- o Passungen

**Abmessungen**



**Höchste Anforderung an  
Herstellprozess,  
Trocknung und Brenntechnik**

## **Anforderungen an keramische Bauteile**

- Einsatz bei Temperaturen von 600 °C bis 1650 °C
- Support und Transport von immer höheren Lasten
- Last und Temperatur in Kombination
- Verbesserte Temperaturwechselbeständigkeit
- Hohe chemische Resistenz
- Geeignetes Benetzungsverhalten
- Engere Toleranzen
- Höhere Lebensdauer
- Niedrigere Energiekosten
- Niedrigere Betriebskosten (Rationalisierung)
- Reduzierung der Durchlaufzeiten (Schnellbrand)



### Materialauswahl für Rollenöfen



3.1. Hochtemperaturwerkstoffe Folie 15

## **Rollenwerkstoffe (neue Entwicklungen)**

### **Corundum Mullite (CM):**

Gute TWB, geringe Kriechneigung bei Temperaturen bis 1.550°C

### **Corundum Zirconia (CZ):**

**Hohe chemische Resistenz**

⇒ Einsatz in Metallhärteöfen,

direkter Kontakt zu Na<sub>2</sub>O-haltigen Schmelzen möglich;

Rotationsgeschwindigkeit muss mit steigender Last erhöht werden

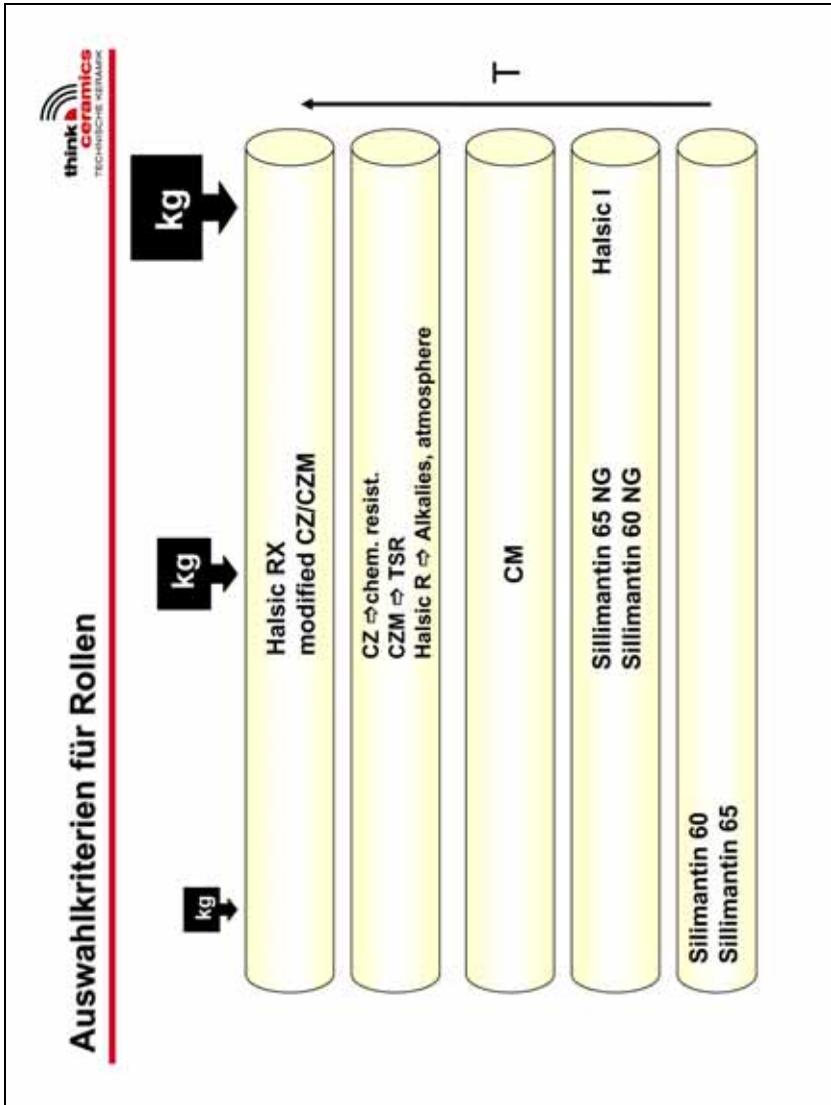
### **Corundum Zirconia Mullite (CZM):**

**sehr hohe TWB**

⇒ Einsatz in Hochtemperaturöfen,

Heißrollenwechsel möglich;

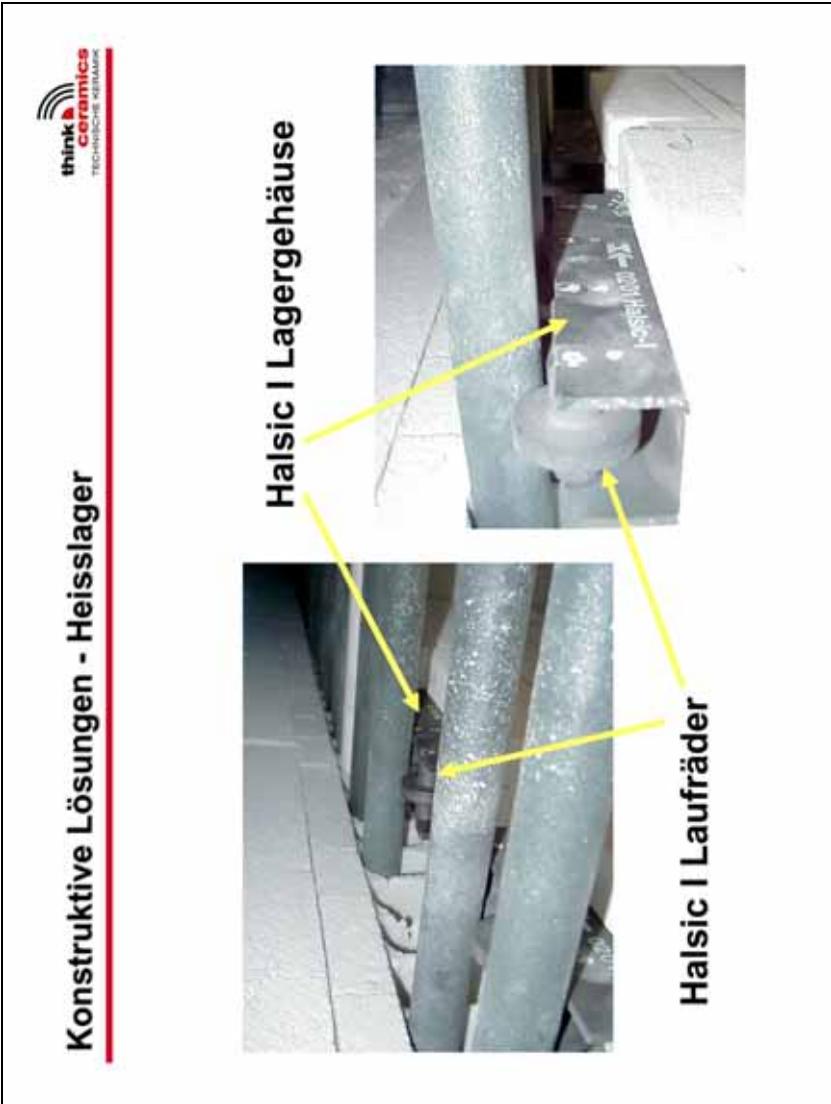
geringe Korrosion bei max. Anwendungstemperatur von 1.600°C



3.1. Hochtemperaturwerkstoffe Folie 17

## **Heißlager in Rollenöfen**

- Erprobte Werkstoffe
- Bewährte Herstellverfahren
- Innovative Gestaltung
- Innovative Anwendungen für:
  - Höhere Lasten
  - größere Spannweiten
  - Energieeinsparung

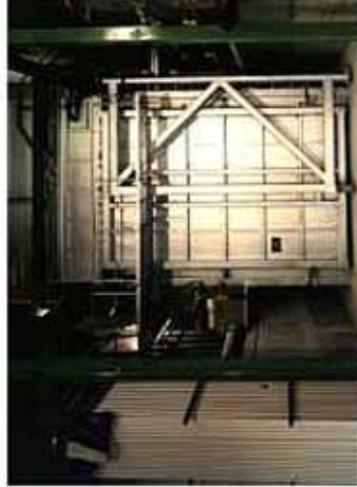


3.1. Hochtemperaturwerkstoffe Folie 19

## Brennhilfsmittel – Aufhängung



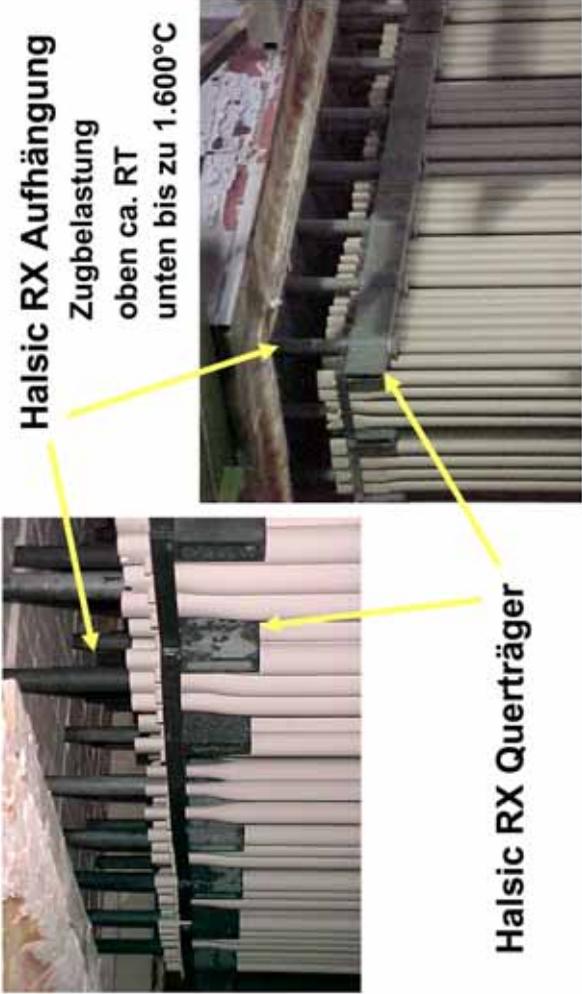
## Deckenförderofen



Volumen: 85 m<sup>3</sup>  
Brenngut-Tonnage: 16-18 t  
entspricht 1700 – 2500 Rollen  
T<sub>max</sub>: 1.600°C  
Kalt-kalt: < 72 h

**Konstruktive Lösungen – Halsic RX BHM**

**Halsic RX Aufhängung**  
Zugbelastung  
oben ca. RT  
unten bis zu 1.600°C



**Halsic RX Querträger**

**think ceramics**  
TECHNOLOGIE VERBUNDEN

3.1. Hochtemperaturwerkstoffe Folie 21

## Schlussbetrachtung

**Steigende Anforderungen** können erfüllt werden durch **Werkstoffentwicklungen, konstruktive Lösungen** sowie eine **Kombination** aus Werkstoff und Konstruktion.

Die Voraussetzung für einen **Kosten-Nutzen-optimierten Einsatz** von Keramik ist die enge **partnerschaftliche Zusammenarbeit** von Keramikhersteller und Anlagenbauer bzw. Anlagenbetreiber