

Werkstoffe zur Wärmedämmung unter Berücksichtigung des Einsatzes von Keramikfasern

G. Sonnenschein

1 Einleitung

Zur Nutzung des Feuers durch den Menschen wurden zum Erschmelzen von Metallen (Bronzen, Eisen) und deren handwerklichen Bearbeitung Werkstoffe benötigt, die einen sicheren Umgang mit dem Feuer und den flüssigen, glühenden Metallen erlaubten.

Im allgemeinen Sprachgebrauch wurden die zur Beherrschung dieser Prozesse benötigten Wärmedämmstoffe als Schamotte bezeichnet. Schamotte entsteht durch Brennen von Ton über 1 000 °C.

Im Zuge der Industrialisierung hat sich eine spezielle Branche, der so genannte Feuerfestbau, entwickelt. Feuerfeste Auskleidungen sind in Öfen und Aggregaten der Eisen- und Stahlindustrie, der Nichteisenindustrie, der Baustoff- und Glasproduktion, der Chemie- und Mineralölindustrie, sowie auch in Kraftwerken und thermischen Abfallbehandlungsanlagen unentbehrlich.

2 Industrieller Einsatz von Feuerfestmaterialien

Aufgrund der vielen Anwendungsbedingungen haben sich eine Vielzahl von geformten dichten Werkstoffen (Schwerzustellung), geformte wärmedämmende Werkstoffe (Leichtsteinzustellung) und ungeformte feuerfeste Werkstoffe (Stampfmassen) entwickelt, die jeweils für spezielle Hochtemperaturanwendungen verwendet werden. Als Dehnfugenmaterial kommen z. B. Schnüre oder Gewebe, in der Vergangenheit aus Asbest, zum Einsatz.

Aber auch andere, künstlich hergestellte Faserprodukte werden seit vielen Jahrzehnten zur Wärmedämmung genutzt, wobei im Niedrigtemperaturbereich (um 200 °C, aber auch bis maximal 500 °C) Glas- und Schlackewollen im Wesentlichen als Hinterisolierung eingesetzt werden. In Öfen mit Schwerzustellung üblicherweise Asbest in Form von Platten eingesetzt.

In den 60er Jahren kamen erstmalig in der Bundesrepublik Deutschland Keramikfasern auf den Markt und fanden wegen ihrer hohen Temperaturbeständigkeit sehr schnell Eingang in bestimmte Bereiche des Ofenbaus.

Die Faserisolation ermöglichte eine leichtere Bauweise von Industrieöfen mit vielen ökonomischen und ökologischen Vorteilen [1]. Dies macht sich insbesondere in geringeren Wandstärken und wesentlich geringeren Massen der Isolation (Schwerisolation 1 500 bis 3 500 kg/m³, Faserisolation max. 300 kg/m³) bemerkbar. Der typische Wandaufbau eines Glühofens mit Schwerzustellung im Vergleich zu einer Faserzustellung ist in Bild 1 zu sehen.

Aus diesem Beispiel geht deutlich hervor, dass Keramikfasern aus technologisch-wirtschaftlichen Gründen ent-

Zusammenfassung Im Bereich der industriellen Wärmedämmung stehen den Anwendern eine Reihe von Baustoffen zur Verfügung. Neben den klassischen Feuerfeststeinen und Stampfmassen werden heute auch Faserprodukte für die Hochtemperaturanwendung eingesetzt. Der Anwender hat neben den technischen, ökonomischen und ökologischen Bedingungen auch zu prüfen, ob Isolierstoffe mit einem möglichst geringen Risiko für Mensch und Umwelt eingesetzt werden können. Die TRGS 619 „Ersatzstoffe für Keramikfasern im Ofen- und Feuerfestbau“ ermöglicht eine Entscheidungsfindung zur Hochtemperatur-Wärmedämmung unter Beachtung aller Bedingungen.

Materials used for thermal insulation under special consideration of the use of ceramic fibres

Abstract In the field of industrial thermal insulation, a range of construction materials is available. Aside from the classic refractory blocks and castables, fibre products are also often used for high-temperature applications today. Builders and planners must also assess whether the insulating materials can be used that pose the least possible risk to people and the environment alongside the considerations that have to be made about the technical, economic, and ecological conditions. TRGS (the technical rules for hazardous substances) 619 „Substitute materials for ceramic fibres in the construction of kilns and furnaces“ (Ersatzstoffe für Keramikfasern im Ofen- und Feuerfestbau) helps planners make the appropriate choices for high-temperature thermal insulation under consideration of all conditions.

wickelt wurden und nicht als Ersatzstoff für Asbest. Im Zuge des Verwendungsverbots für Asbest wurden zwangsläufig auch Keramikfasern als Ersatz z. B. für Asbestschnüre, -gewebe und -platten eingesetzt.

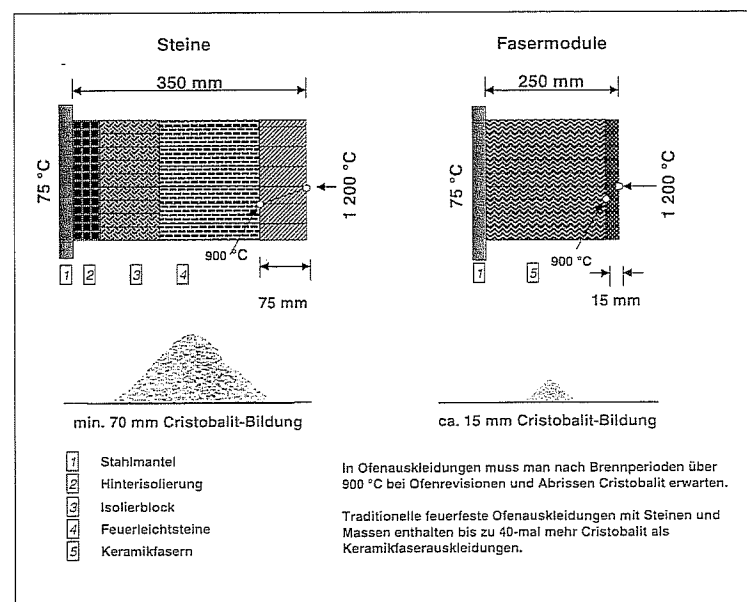


Bild 1 Ofenisolation: Vergleich Schwer- zu Faserisolation.

Dipl.-Ing. Günter Sonnenschein,
Verwaltungsgemeinschaft Maschinenbau- und Metall-Berufsgenossenschaft und
Hütten- und Walzwerks-Berufsgenossenschaft, Düsseldorf.

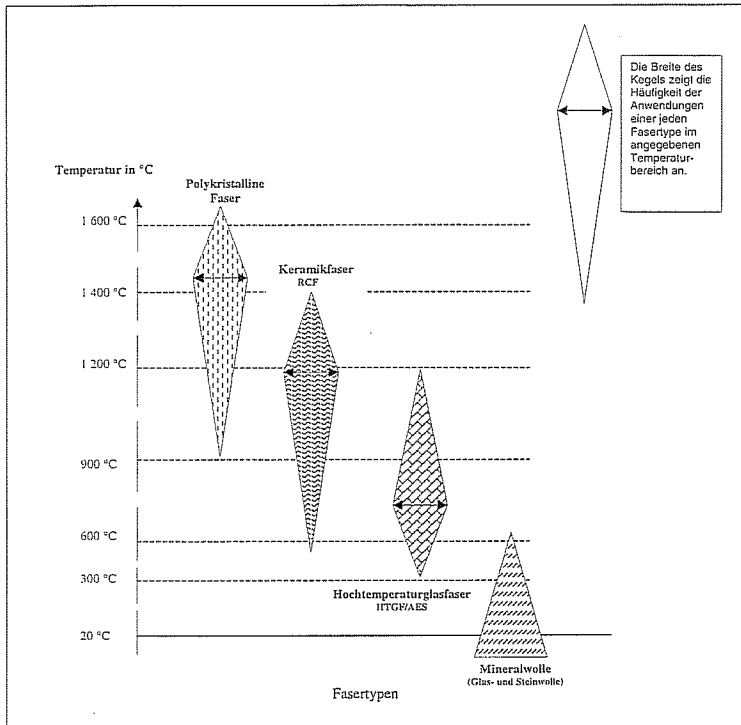


Bild 2 | Temperaturbereiche für die Anwendung von anorganischen künstlichen Mineralfasern.

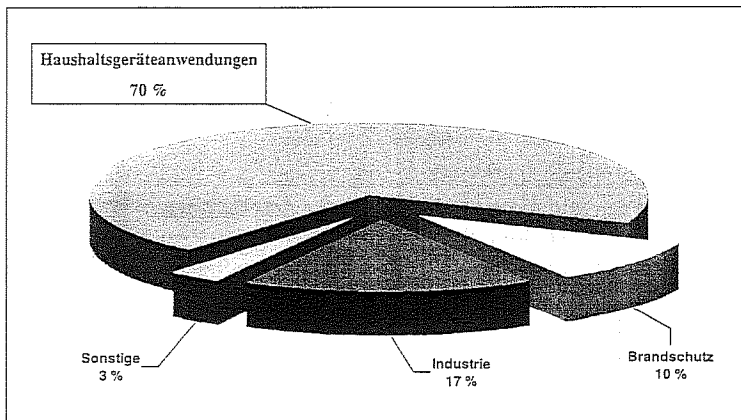


Bild 3 | Anwendungsgebiete von AES-Fasern. Verbrauch Europa: 8 500 t/a im Jahre 2001.

3 Parameter der biologischen Wirkung von Faserstäuben

Mit dem Erkenntnisgewinn der letzten Jahre wurde festgestellt, dass künstliche Mineralfasern krebserzeugend sein können (siehe z. B. TRGS 900 [2] und TRGS 905 [3]). Dabei sind von Bedeutung:

- die Faserabmessung,
- die Biobeständigkeit.

Entsprechend einer internationalen Konvention werden Fasern, die eine Länge > 5 µm, einen Durchmesser < 3 µm und ein Verhältnis von Länge zu Durchmesser von 3 : 1 aufweisen (WHO-Fasern), als kanzerogen betrachtet.

Die Biobeständigkeit kann auf der Basis nachstehender Methoden ermittelt werden.

- In-vivo-Beständigkeit: Die Einstufung kann durch die

Bestimmung der In-vivo-Beständigkeit erfolgen. Dabei spielt die Halbwertszeit (größer oder kleiner 40 Tage) eine entscheidende Rolle.

- Intraperitoneale Applikation (i. P.-Test): Die Einstufung kann auch durch einen Kanzerogenitätsversuch mit intraperitonealer Applikation vorgenommen werden.
- Kanzerogenitätsindex KI: Bewertung der WHO-Fasern auf der Grundlage des Kanzerogenitätsindex aus der Differenz zwischen der Summe der Massegehalte bestimmter Oxide.

4 Arten und Einsatzbereiche künstlicher Mineralfasern

Die unterschiedlichen künstlichen Mineralfasern werden in verschiedenen Temperaturbereichen eingesetzt. Diese Temperaturbereiche lassen sich in groben Zügen aus Bild 2 [4] ablesen.

Die heute erhältlichen Mineralwollen enthalten zwar WHO-Fasern, aufgrund ihres Kanzerogenitätsindex oder ihrer Biobeständigkeit erfolgt aber keine Einstufung in eine krebs-erzeugende Kategorie. Viele der Mineralwolle-Produkte werden im Baubereich eingesetzt. Aber auch in der technischen Wärmedämmung werden Mineralwollen bei Temperaturen bis 300 °C, bei einzelnen Anwendungen auch bis 500 °C verwendet.

Hochtemperaturglasfasern (HTGF) werden auch als AES-Fasern (Alkaline Earth Silicate Fibres) bezeichnet. Sie sind erst in den letzten Jahren auf den Markt gekommen und erfüllen in der Regel die Forderung der geringen Biobeständigkeit. Die aktuelle Liste der AES-Fasern mit Zertifikat nach den Forderungen des Anhangs V Nr. 7 Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) [5] eines anerkannten Prüfinstitutes (z. B. Fraunhofer-Institut) kann im Internet unter www.ecfia.org oder www.dkfg.de eingesehen oder abgerufen werden. Der Temperaturbereich der Anwendung hat seinen Schwerpunkt zwischen 500 °C bis 900 °C, wobei die Anwendung im Wesentlichen im Bereich der Haushaltsgeräteindustrie (Back- und Mikrowellenöfen, Boiler, Toaster, Fön u. a. m.) liegt (siehe Bild 3).

Keramikfasern, auch Refractory Ceramic Fibres (RCF) genannt, finden hauptsächlich in Temperaturbereichen von ca. 900 °C bis 1 400 °C im Industrieofenbau ihre Anwendung, insbesondere wenn ein schneller Ofenzyklus zwischen kalt und warm erforderlich ist (Bild 4).

Keramikfasern sind nach Gefahrstoffverordnung und den nachgeordneten Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) in die Kategorie K2 eingestuft. Die Definition K2 bedeutet: „Stoffe, die als krebserzeugend für den Menschen angesehen werden sollten. Es bestehen hinreichende Anhaltspunkte zu der begründeten Annahme, dass die Exposition eines Menschen gegenüber dem Stoff Krebs erzeugen kann. Diese Annahme beruht im Allgemeinen auf geeigneten Langzeit-Tierversuchen sowie sonstigen relevanten Informationen.“

Damit besteht für jeden Anwender von Keramikfasern die Pflicht der Prüfung, ob Produkte mit einem geringeren gesundheitlichen Risiko eingesetzt werden können.

5 Regelungen der TRGS 619

Um den Unternehmen eine Hilfe zu geben, wie sie dieser Verpflichtung nachkommen können, wurde vom Unterausschuss IV „Arbeitsplatzbewertung“ im Ausschuss für

Gefahrstoffe (AGS) die Technische Regel für Gefahrstoffe TRGS 619 „Ersatzstoffe für Keramikfasern im Ofen- und Feuerfestbau“ erarbeitet. Der AGS hat diese TRGS auf seiner Sitzung im Mai 2002 verabschiedet und das Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung hat sie im Bundesarbeitsblatt [4] veröffentlicht.

Als Ersatzstoffe für Keramikfasern zur Wärmedämmung im Ofen- und Feuerfestbau kommen sowohl andere faserförmige als auch faserfreie Feuerfestprodukte in Frage. Bei der Auswahl möglicher Ersatzstoffe gibt das „Anforderungsprofil zur Ersatzstoffprüfung gemäß § 36 GefStoffV“ (Anlage 1 der TRGS 619, siehe **Tabelle 1**; hier an einem Beispiel aus der Automobilindustrie) Hinweise. Dabei muss sich der Anwender natürlich über die in seinem Anwendungsfall gegebenen technischen Bedingungen im Klaren sein.

Die feuerfeste Faserzustellung (AES- oder Keramikfasern) im Industrieofen hat ihren größten wirtschaftlichen Vorteil gegenüber Schwer- und Leichtzustellungen beim periodischen Ofenbetrieb.

Am Beispiel eines Schmelzofens lässt sich sehr deutlich die Wirtschaftlichkeit einer Faserzustellung darstellen (**Tabelle 2**). Im Vergleich zwischen AES- und Keramikfasern kann z. B. die Geschwindigkeit der Verbrennungsgase eine nicht unwesentliche Rolle für die Standfestigkeit der jeweiligen Faserdämmung spielen. In **Bild 5** sind deutliche Erosionserscheinungen an der AES-Isolierung (hier CMF = Calcium-Magnesium-Silikat-Faser) durch die hohe Gasgeschwindigkeit zu sehen.

Nach der konsequenten Anwendung der Auswahlkriterien für feuerfeste Steine/Massen bzw. Fasern ist die Entscheidung, welches Produkt technisch möglich und zumutbar ist, anhand der +/- Zeichen (siehe **Tabelle 1**) abzulesen. Die Umsetzung der Ersatzstoffprüfung nach TRGS 619 in die betriebliche Praxis ist damit im Hauptanwendungsbereich, dem Industrieofenbau, einfach und objektiv durchzuführen.

Aber auch außerhalb des Feuerungsbaus ist das Anforderungsprofil zur Ersatzstoffprüfung anwendbar. Ein typisches Beispiel wird aus dem Bereich der Automobil-Katalysatoren-Isolation aufgezeigt. Dabei wird deutlich, dass die Vibrationsbeständigkeit der keramischen Fasern gegenüber der AES-Faser die entscheidende Auswahlkomponente ist (**Tabelle 1**).

6 Schutzmaßnahmen

Beim Umgang mit diesen Wärmedämmstoffen im Ofen- und Feuerfestbau sind insbesondere Schutzmaßnahmen für die Beschäftigten gegen mögliche Expositionen gegenüber Faserstäuben und Quarz-/Cristobalitstaub zu treffen. Bezüglich der Faserstäube sind in der TRGS 521 [6] differenzierte Schutzmaßnahmen in Abhängigkeit der Einstufung der Fasermaterialien angegeben. Für alveolengängige Quarz-/Cristobalitstäube sind die entsprechenden Schutzmaßnahmen nach der Berufsgenossenschaftlichen Regel BGR 217 [7] zu beachten.

Nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen ist alveolengängiger Quarz- und Cristobalitstaub als humankarzinogen zu betrachten [8]. Diese Erkenntnisse haben natürlich auch auf die Auswahl von und den Umgang mit Wärmedämmstoffen aller genannten Produktgruppen Einfluss.

- Feuerfest-Steine/Massen (FF-Steine/Massen)

Viele der nicht faserförmigen Feuerfestmaterialien enthal-

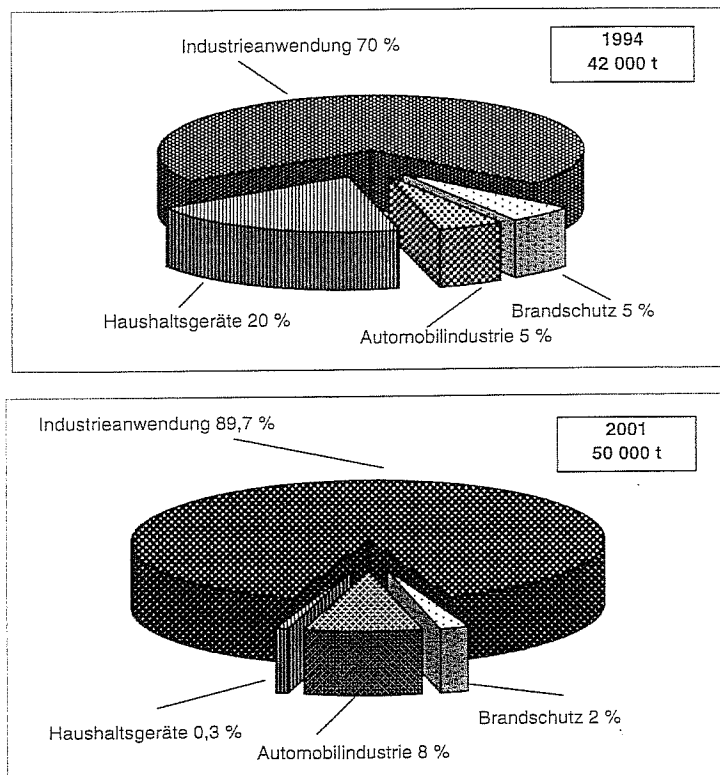


Bild 4 | Anwendungsbereiche von Keramikfaserprodukten in Europa, Vergleich 1994 bis 2001.

Quelle: ECFA/DKFG, Dez. 2000



Bild 5 | Erosionserscheinung an einer Ofenauskleidung durch Gasgeschwindigkeit. Modulauskleidung aus CMS-Faser.

ten bereits im Neuzustand Quarz. Bei thermischer Belastung über 900 °C wird er stetig in Cristobalit umgewandelt. Bei Neuzustellung können somit alveolengängige Quarzstäube und bei Instandsetzungs- und Abbrucharbeiten Quarz- und Cristobalitstäube freigesetzt werden. Beschäftigte, die diesen Stäuben ausgesetzt sind, sind durch Schutzmaßnahmen, insbesondere die in den Vorschriften genannten [7], zu schützen.

- AES-Fasern

Beim Umgang mit neuen und thermisch < 900 °C belasteten AES-Fasern ist die BGR 217 und der Allgemeine Staubgrenzwert zu beachten. Bei thermischer Belastung der

Tabelle 1 Anforderungsprofil zur Ersatzstoffprüfung gemäß § 36 GefStoffV.

Beschreibung der Aufgaben und der Einsatzbedingungen:					
Automobilindustrie Katalysatortechnik			Bearbeiter:		Datum 04.12.2002
Auswahlkriterien bei der Anwendung von FF-Steinen/Massen bzw. Fasern					
	erforderliche Anwendungsbedingungen	Steine/Massen		Fasern	
		leicht	schwer	AES	Keramik
1. Anwendungstemperatur in °C	1 100	bis 1900	bis 2000	500 bis 1200	600 bis 1400
2. Klassifikationstemperatur in °C	1 260	bis 1900	bis 2000	1050 bis 1260	1260 bis 1430
3. Wärmeleitfähigkeit in W/mK	< 0,5	0,2 bis 15,0 bei 1 100 °C bei unterschiedlicher Dichte		(z. B. 0,31 bei 1000 °C und einer Dichte von 128 kg/m³)	
4. Schmelzpunkt in °C	> 1400	1 100 bis > 2600		> 1400	> 1720
5. Rohdichte in kg/m³	128 bis 160	700 bis 1500	1500 bis 3500	60 bis 300	60 bis 300
6. mechanische Festigkeit	Nein/ Flexibilität wichtig				
6.1 erforderlich	Nein	+/-	++	-	-
6.2 Rückfederungsverhalten					
a) Neuzustand	erforderlich	nicht vorhanden		+	++
b) nach Temperaturbeaufschlagung	erforderlich	nicht vorhanden		-	++
c) Dehnungsfugen	nicht erforderlich	erforderlich		nicht erforderlich	
6.3 Schwingungen/Vibrationen	stark	-	-	+ nur bedingt	++
6.4 Gasgeschwindigkeit > 40 m/s	< 40 m/s; gekapselt	++	++	-/+	+/-
7. Temperaturwechselbeständigkeit	sehr wichtig	+/-	-/+	+	++
8. Verstaubungsverhalten					
8.1 Neuzustand	Schutzmaßnahmen	++	++	+/-	+/-
8.2 nach Temperaturbelastung	gekapselt	größer als im Neuzustand			
9. Anwendung in Hochtemperatur-Öfen					
9.1 Ofenatmosphäre					
- neutral/oxidierend		++	++	+	+
- reduzierend		++	++	+/-	+/-
- Feuchtigkeit/Kondensat/Kristallwasser		++	++	-/+	+
9.2 kontinuierlicher Betrieb					
- elektrisch, keine Chemie ¹		++	++	++	++
- elektrisch, plus Chemie ²		+/-	+	+/-	+/-
- Gas, keine Chemie		++	++	+	++
- Gas, plus Chemie		+/-	+	-/+	+/-
- Öl (Extraleichtöl)		+	+	+	+
- Öl (Schweröl)		-/+	-/+	-	-
9.3 periodischer Betrieb					
- elektrisch, keine Chemie ¹		+	+/-	+/-	+
- elektrisch, plus Chemie ²		+/-	-/+	-/+	+/-
- Gas, keine Chemie		+	+/-	+/-	+
- Gas, plus Chemie		+/-	-/+	-	+/-
- Öl (Extraleichtöl)		+	+/-	-/+	+
- Öl (Schweröl)		keine Anwendung			
10. Wirtschaftlichkeits- und Umweltschutzkriterien					
- Investitionskosten	wichtig	↘	↘	↗	↗
- Energieeinsparung	wichtig	↘	↘	↗	↗
- CO ₂ /NO _x -Emissionen	wichtig	↘	↘	↗	↗
- Anlagenflexibilität	wichtig	↘	↘	↗	↗
- Produktivität	wichtig	↘	↘	↗	↗
- Standzeit	wichtig	↘	↘	↗	↗
- Instandhaltung/Reparatur	wichtig	↘	↘	↗	↗
11. Hinweise, die bei der Anwendung von FF-Steinen/Massen bzw. Fasern zu beachten sind					
11.1 Umgangsvorschriften		BGR 217 Umgang mit mineralischem Staub		Siehe TRGS 521, Teil 1 und TRGS 521 Anhang 5 „Keramikfasern“	
11.2 Luftgrenzwerte Allgemeiner Staub Quarz Fasern		mg/m³ 3 A/10 E 0,15 -		F/m³ 3 A/10 E (mg/m³) (0,15 mg/m³)* 500 000	
11.3 Entsorgung	Beachtung der länderspezifischen Regelungen				

¹keine Chemie: Keine Freisetzung von chemischen Substanzen aus dem Brenngut/Brennstoff

²plus Chemie: Freisetzung von chemischen Substanzen aus dem Brenngut/Brennstoff

- nicht anwendbar, -/+ in Ausnahmefällen anwendbar, +/- nicht immer anwendbar, + grundsätzlich anwendbar, ++ sehr gut anwendbar

* Bei Anwendungstemperatur > 900 °C

Tabelle 2 | Beispielrechnung für verschiedene Auskleidungen eines Schmiedeofens in der Stahlindustrie.

Betriebsdaten: Erdgas (0,17 €/m³) betriebener, periodischer Hochtemperatur-Schmiedeofen, Brenntemperatur: 1 300 °C; 48 Aufheizungen pro Jahr; 4 700 Betriebsstunden pro Jahr;
Auskleidungsfläche: 212 m²; Vergleich bei fünfjähriger Nutzung.

A. Ofendaten		Schwerzustellung	Leichtzustellung	Faserzustellung
stationäre Wärmestromdichte	in W/m ²	784,81	668,35	778,61
spezifische Speicherwärme	in MJ/m ²	817,82	330,35	45,33
Wandverluststromdichte	in W/m ²	1 665,86	861,41	486,74
Wanddicke	in mm	439	458	325
spezifische Investitionskosten (5 Jahre)	in €/m ²	443,47	391,53	292,74
Betriebskosten (Energie)	in €/m ² /a	414,27	214,22	121,04
Gesamtkosten	in €/m ² /a	502,96	292,52	179,59
Höherer Energieverbrauch = mehr CO ₂		70 %	58 %	Basis
B. Wirtschaftliche und umweltrelevante Aspekte:				Einsparung: ca. 68 500 €/a
Fundament		↓	→	↑
Stahlbau		↓	↘	↑
Rohstoffverbrauch		↓	↘	↑
Investitionskosten		↓	↘	↑
Betriebskosten		↓	→	↑
Flexibilität		↓	↘	↑
Produktivität		↓	→	↑
Sozioökonomischer Aspekt		↓	↘	↑
Abfall/Entsorgung		↓	↘	↑

↑ : günstig
→ : neutral
↘ : ungünstig
↓ : sehr ungünstig

AES-Fasern > 900 °C bildet sich Cristobalit [9]. Können beim Umgang alveolengängige Cristobalitstäube entstehen, sind darüber hinausgehende Schutzmaßnahmen zu treffen (TRGS 521, Abschnitt 6).

● Keramikfasern

Beim Umgang mit Keramikfasern sind die Vorgaben der TRGS 521 Teil 1 generell zu beachten. Im Anhang 5 dieser TRGS sind spezielle Schutzmaßnahmen für den Umgang mit Keramikfasern detailliert aufgeführt [10 bis 13]. Bei thermischer Belastung der Keramikfasern > 900 °C kann sich je nach Fasertyp, Temperatur und Einsatzdauer Cristobalit bilden. Können beim Umgang alveolengängige Cristobalitstäube entstehen, sind darüber hinausgehende Schutzmaßnahmen zu treffen (TRGS 521, Abschnitt 6).

7 Zusammenfassung

Von Ofenbauern, Anwendern, Berufsgenossenschaften und Staatlichen Ämtern für Arbeitsschutz wurde die Ersatzstoffprüfung mithilfe der TRGS 619 bereits in einigen Fällen in der Praxis erfolgreich durchgeführt. Zusammenfassend kann aufgrund dieser Praxisversuche bei der Anwendung der TRGS 619 gesagt werden, dass für den jeweiligen Anwendungszweck die beste technische ökologische und ökonomische Lösung, auch unter Beachtung des Arbeitsschutzes, gefunden wird. Der Unternehmer erfüllt damit die Forderungen des § 36 GefStoffV.

Literatur

- [1] Feuerfestbau. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Feuerfest- und Schornsteinbau (DGFS). 3. Aufl. Essen: Vulkan 2003.
- [2] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz – Luftgrenzwerte (TRGS 900). BArbBl. (2000) Nr. 10, S. 34-63; zul. geänd. BArbBl. (2003) Nr. 3, S. 69-72.
- [3] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe (TRGS 905). BArbBl. (2001) Nr. 3, S. 97-101; zul. geänd. BArbBl. (2003) Nr. 3, S. 97.
- [4] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Ersatzstoffe für Keramikfasern im Ofen- und Feuerfestbau (TRGS 619). BArbBl. (2002) Nr. 10, S. 64-67.
- [5] Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen. GefStoffV – Gefahrstoffverordnung. Neufassung vom 15. November 1999.
- [6] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Faserstäube (TRGS 521). BArbBl. (2002) Nr. 5, S. 96-110.
- [7] Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit: Umgang mit mineralischem Staub (BGR 217). Köln: Carl Heymanns 2002.
- [8] Quarz – Einstufung, Dosis-Wirkungs-Beziehungen – Workshop vom 7./8. März 2002 in Berlin. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 2002. www.baua.de/info/tb02_03/tb131.htm.
- [9] Binde, G.; Bolender, T.: Rekrystallisation und Cristobalitbildung in Hochtemperaturglasfasern (AES) nach thermischer Belastung. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 62 (2002) Nr. 6, S. 273-278.
- [10] Welzbacher, U.: Sicherer Umgang mit Keramikfasern. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 62 (2002) Nr. 9, S. 365-368.
- [11] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Schutzmaßnahmen Mindeststandards (TRGS 500). BArbBl. (1998) Nr. 3, S. 57-58.
- [12] Class, P.; Brown, C.: Exposition gegenüber künstlichen Mineralfasern. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 62 (2002) Nr. 5, S. 197-201.
- [13] Wimmer, H.: RCF-Historie und professioneller Umgang. 45. Internationales Feuerfest Kolloquium Aachen, 16.-17. Okt. 2002.