

Feuerfeste Werkstoffe

Feuerfestkeramik

- Eigenschaften
- prüftechnische Beurteilung
- Werkstofftypen

Von Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schulle

Mit 219 Bildern und 143 Tabellen



Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeine Aussagen und Angaben zu den feuerfesten Baustoffen

1.1.	Einführung	13
1.2.	Spezifische Begriffsbestimmung	18
1.3.	Klassifizierung feuerfester Werkstoffe	19
1.4.	Entwicklung der feuerfesten Werkstoffe	22
1.4.1.	Allgemeine Bedeutung und Einsatzbereiche der feuerfesten Werkstoffe	23
1.4.2.	Historische Entwicklung	23
1.4.3.	Einschätzung der quantitativen Entwicklung	25
1.4.4.	Einschätzung der qualitativen Entwicklung	28

2 Eigenschaften und prüftechnische Beurteilung feuerfester Werkstoffe

2.1.	Zielstellung der Eigenschaftsbeurteilung und Bewertung feuerfester Werkstoffe	31
2.2.	Gefügemerkmale	32
2.2.1.	Begriffserläuterung und allgemeine Feststellungen	32
2.2.2.	Bewertung des Makrogefüges	34
2.2.2.1.	Dichte und Rohdichte	34
2.2.2.2.	Porenvolumenmerkmale	36
2.2.3.	Bewertung des Mikrogefüges	47
2.2.3.1.	Phasenbestand	47
2.2.3.2.	Phasenverteilung	52
2.2.4.	Chemische Zusammensetzung	57
2.3.	Verhalten und Eigenschaften beim Erhitzen	60
2.3.1.	Allgemeines Verhalten beim Erhitzen	60
2.3.1.1.	Austrocknen von Feuchtigkeit	61
2.3.1.2.	Verbrennen von organischen Bestandteilen	61
2.3.1.3.	Thermische Zersetzungsreaktionen	62
2.3.1.4.	Festkörperreaktionen	62
2.3.1.5.	Sinterung	63
2.3.1.6.	Schmelzen und Erweichungsverhalten	65
2.3.1.7.	Modifikationswechsel	67
2.3.2.	Thermische Effekte	68
2.3.2.1.	Differentialthermoanalyse und Differenzkalorimetrie	68
2.3.2.2.	Thermogravimetrie	71

2.3.3.	Reversible Wärmedehnung	72
2.3.3.1.	Allgemeine Grundlagen	72
2.3.3.2.	Ermittlung der reversiblen Wärmedehnungswerte	74
2.3.3.3.	Reversible Wärmedehnung feuerfester Werkstoffe	78
2.3.4.	Irreversible Wärmedehnung	79
2.4.	Wärmetransportverhalten	79
2.4.1.	Allgemeine Grundlagen des Wärmetransportes	80
2.4.1.1.	Wärmetransport durch Wärmeleitung	80
2.4.1.2.	Wärmetransport durch Temperaturstrahlung	83
2.4.1.3.	Wärmetransport durch Wärme Konvektion	85
2.4.2.	Wärmetransportmodelle für heterogene Körper	86
2.4.3.	Wärmetransport in feuerfesten Werkstoffen	90
2.4.4.	Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit	93
2.4.4.1.	Stationäre Verfahren	93
2.4.4.2.	Instationäre bzw. dynamische Verfahren	94
2.4.5.	Spezifische Wärmekapazität und Temperaturleitfähigkeit	97
2.4.6.	Volumenbezogene Wärmekapazität und Wärmespeichervermögen	99
2.4.7.	Das Strahlungsverhalten feuerfester Werkstoffe	100
2.5.	Festigkeitsverhalten	101
2.5.1.	Allgemeine Grundsätze	102
2.5.2.	Elastische Eigenschaften	103
2.5.3.	Mechanische Festigkeit bei Raumtemperatur	108
2.5.3.1.	Theoretische Festigkeit	109
2.5.3.2.	Reale Festigkeit	110
2.5.3.3.	Statistische Bewertung der Festigkeit	114
2.5.4.	Bruchmechanisches Verhalten	115
2.5.4.1.	Allgemeine Grundlagen und Konzepte	116
2.5.4.2.	Rißfortschritt und Brucheintritt	117
2.5.4.3.	Rißbildung und Schallemission	121
2.5.5.	Festigkeitsverhalten bei höheren Temperaturen	122
2.5.5.1.	Hochtemperaturfestigkeitsverhalten unter Druckspannung	126
2.5.5.2.	Hochtemperaturfestigkeitsverhalten unter Zugspannung	131
2.5.5.3.	Hochtemperaturfestigkeitsverhalten unter Biegespannung	132
2.5.5.4.	Hochtemperaturfestigkeitsverhalten unter Torsionsbelastung	135
2.5.6.	Festigkeitsverhalten unter Temperaturwechsel	137
2.5.6.1.	Rißentstehung und Wärmespannungen	139
2.5.6.2.	Rißfortschritt bzw. Rißwachstum	141
2.5.6.3.	Bewertung des Temperaturwechselverhaltens	144
2.5.7.	Härte und Abriebfestigkeit	146
2.6.	Elektrisches Leitfähigkeitsverhalten	147
2.7.	Korrosionsverhalten bzw. Korrosionsbeständigkeit	151

2.7.1.	Allgemeine Grundlagen und Grundsätze	152
2.7.1.1.	Der Ablösungsprozeß	153
2.7.1.2.	Abtransport des Gelösten	157
2.7.2.	Experimentelle Ermittlung und Bewertung der Korrosionsbeständigkeit	160
2.7.3.	Korrosionswirkung gasförmiger Medien	163
2.7.4.	Kontaktreaktionen zwischen feuerfesten Werkstoffen	164
2.7.5.	Chemische Beständigkeit feuerfester Werkstoffe	164

3 Die verschiedenen Werkstoffgruppen der feuerfesten Baustoffe

3.1.	Geformte feuerfeste Baustoffe	166
3.1.1.	Kieselsäurereiche Erzeugnisse	168
3.1.1.1.	Modifikationen des SiO_2	168
3.1.1.2.	Reaktionsverhalten des SiO_2 mit Fremdoxiden	173
3.1.1.3.	Kieselsäurerohstoffe	174
3.1.1.4.	Silicaerzeugnisse	178
3.1.1.5.	Kieselguterzeugnisse	183
3.1.2.	Schamotteerzeugnisse	184
3.1.2.1.	Rohstoffgrundlage	185
3.1.2.2.	Das System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	188
3.1.2.3.	Bildung und Eigenschaften von Mullit	190
3.1.2.4.	Reaktionsverhalten von Schamotteerzeugnissen mit Fremdoxiden	190
3.1.2.5.	Einfluß des Herstellungsverfahrens auf die Erzeugniseigenschaften	191
3.1.2.6.	Typische Eigenschaften und grundsätzliches Einsatzverhalten	191
3.1.2.7.	Erzeugnisarten und spezifisches Einsatzverhalten	194
3.1.3.	Erzeugnisse auf Kaolinbasis	199
3.1.3.1.	Anforderungen an Kaoline	201
3.1.3.2.	Schamotteerzeugnisse mit Kaolinbindung	202
3.1.3.3.	Kaolinerzeugnisse	202
3.1.3.4.	Spezielle Eigenschaften und Einsatzverhalten	204
3.1.4.	Hochtonerdehaltige Erzeugnisse	204
3.1.4.1.	Rohstoffgrundlage und spezielle Rohstoffmerkmale	205
3.1.4.2.	Einteilung der hochtonerdehaltigen Erzeugnisse	209
3.1.4.3.	Bildung und Eigenschaften von Korund	210
3.1.4.4.	Reaktionsverhalten mit Fremdoxiden	211
3.1.4.5.	Erzeugnisarten und spezifisches Erzeugnisverhalten	211
3.1.4.6.	Kohlenstoffhaltige hochtonerdehaltige und Korund-Graphit-Erzeugnisse	218
3.1.5.	Gesinterte zirconiumhaltige Erzeugnisse	220
3.1.5.1.	Ausgangrohstoffe	221
3.1.5.2.	Zirconiumsilicaterzeugnisse	223

3.1.5.3.	Zirconium- und hochtonerdehaltige Erzeugnisse	224
3.1.5.4.	ZrO ₂ -Erzeugnisse	225
3.1.6.	Forsteriterzeugnisse	227
3.1.6.1.	Rohstoffgrundlage	227
3.1.6.2.	Eigenschaften und Anwendungsverhalten	228
3.1.7.	MgO- und MgO-Spinell-Erzeugnisse	230
3.1.7.1.	Rohstoffgrundlage und Herstellung von MgO-Sinter	231
3.1.7.2.	Rohstoffgrundlage für Spinelle und Chromerz	241
3.1.7.3.	Eigenschaften und Reaktionsverhalten von MgO (Periklas)	248
3.1.7.4.	Bewertung und Eigenschaften von MgO-Sintern	255
3.1.7.5.	Eigenschaften und Erzeugnisverhalten von Periklaserzeugnissen	260
3.1.7.6.	Periklas-Spinell-(Chromerz-)Erzeugnissen	263
3.1.7.7.	Kohlenstoffhaltige MgO-Erzeugnisse	269
3.1.7.8.	Spinell-(Chromerz-) und Cr ₂ O ₃ -Erzeugnisse	272
3.1.8.	CaO-MgO-Erzeugnisse	275
3.1.8.1.	Rohstoffe	275
3.1.8.2.	Eigenschaften von Sinterdolomit	277
3.1.8.3.	Eigenschaften und Einsatzverhalten von CaO-MgO-Erzeugnissen	279
3.1.8.4.	Eigenschaften und Einsatzverhalten von CaO-Erzeugnissen	283
3.1.9.	Feuerfeste Sonderwerkstoffe	284
3.1.9.1.	Hochfeuerfeste oxidkeramische Werkstoffe	285
3.1.9.2.	Zinnoxid-Werkstoffe (Stannokeramik)	290
3.1.9.3.	Hochfeuerfeste nichtoxidische Werkstoffe	291
3.1.10.	Kohlenstoffhaltige Erzeugnisse	294
3.1.10.1.	Allgemeine Rohstoffbasis	294
3.1.10.2.	Spezielle Eigenschaften und das Reaktionsverhalten wichtiger Rohstoffe	295
3.1.10.3.	Allgemeine Übersicht zu kohlenstoffhaltigen Erzeugnissen	300
3.1.10.4.	Kohlenstofferzeugnisse	301
3.1.10.5.	Feuerfeste Werkstoffe auf SiC-Basis	303
3.1.10.6.	Kohlenstoffhaltige Schmelztiegel	306
3.1.11.	Schmelzgegossene Erzeugnisse	310
3.1.11.1.	Herstellungsbedingungen	310
3.1.11.2.	Allgemeine Eigenschaften und ihre Beurteilung	314
3.1.11.3.	Eigenschaften und Einsatzverhalten der verschiedenen Typen schmelzgegossener Erzeugnisse	316
3.2.	Ungeformte feuerfeste Baustoffe	327
3.2.1.	Definition und Einteilung	328
3.2.2.	Allgemeine Gesichtspunkte der Bewertung	331
3.2.3.	Gemenge und Massen für monolithische Zustellung	331
3.2.3.1.	Herdstampfgemenge	333
3.2.3.2.	Gemenge zur Zustellung von Pfannen	333

3.2.3.3. Stichloch- und Rinnengemenge	336
3.2.3.4. Induktionsofengemenge	337
3.2.4. Gemenge für Reparatur- und Pflegearbeiten	339
3.2.4.1. Reparaturtechniken mit Gemengen und Massen	339
3.2.4.2. Verhalten und Merkmale von Reparaturgemengen	342
3.2.5. Material zum Verlegen und Verfugen	343
3.2.6. Material für den Oberflächenschutz	343
3.3. Feuerbetonerzeugnisse	345
3.3.1. Begriffsbestimmung Feuerbeton	345
3.3.2. Systematik und Klassifikation der Feuerbetone	346
3.3.3. Varianten der Feuerbetonfertigung und -zustellung	347
3.3.3.1. Feuerbeton-Zustellung mittels Gemenge	348
3.3.3.2. Feuerbeton-Zustellung mittels Fertigbauteilen	349
3.3.3.3. Technisch-ökonomische Aspekte der Zustellung mit Feuerbetonen	351
3.3.4. Eigenschaften und Einsatzverhalten der Feuerbetone mit hydraulischer Bindung	352
3.3.4.1. Allgemeine Vorbemerkungen	352
3.3.4.2. Zur Wirkungsweise der hydraulischen Bindung	352
3.3.4.3. Bindung mit silicatischen Zementen	357
3.3.4.4. Bindung mit aluminatischen Zementen	363
3.3.5. Eigenschaften und Einsatzverhalten der Feuerbetone mit chemischer Bindung	372
3.3.5.1. Allgemeine Vorbemerkungen zur chemischen Bindung	372
3.3.5.2. Bindung mit Wasserglas	374
3.3.5.3. Bindung mit Phosphorverbindungen	377
3.3.5.4. Bindung mit Magnesia-Magnesiumsalzen	377
3.3.6. Eigenschaften und Einsatzverhalten der Feuerbetone mit hydröthmaler Bindung	379
3.3.7. Eigenschaften und Einsatzverhalten der Feuerbetone mit Bewehrung	380
3.3.7.1. Einsatz von Bewehrungsstählen	380
3.3.7.2. Einsatz von Fasern	381
3.4. Hochtemperaturwärmedämmstoffe	383
3.4.1. Bezeichnung und Klassifizierung	383
3.4.2. Technische und ökonomische Bedeutung	385
3.4.3. Prinzipien und Methoden der Bewertung	388
3.4.3.1. Beurteilung des Temperaturanwendungsbereiches	388
3.4.3.2. Schwindungs- und Nachschwindungsverhalten	390
3.4.3.3. Wärmedämmwirkung bei hohen Temperaturen	391
3.4.3.4. Festigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit	395
3.4.3.5. Korrosionsbeständigkeit	397
3.4.3.6. Technisch-ökonomische Bewertung	397

3.4.4. Eigenschaften und Einsatzverhalten von geformten Hochtemperaturwärmedämmstoffen auf der Grundlage von porösen Ausgangsstoffen	400
3.4.4.1. Einsatz natürlicher poröser Rohstoffe	400
3.4.4.2. Einsatz von porösen Körnungen aus Brennprozessen	401
3.4.4.3. Einsatz von Hohlkugelnkörnungen	404
3.4.5. Eigenschaften und Einsatzverhalten von geformten Hochtemperaturwärmedämmstoffen auf der Grundlage von Ausbrennstoffen	405
3.4.6. Eigenschaften und Einsatzverhalten von geformten Wärmedämmstoffen auf der Grundlage von Schaum- und Gastreibeverfahren	408
3.4.7. Eigenschaften und Einsatzverhalten von Feuerleichtbetonen	409
3.4.8. Eigenschaften und Einsatzverhalten von hydrothermal erhärteten Hochtemperaturwärmedämmstoffen	412
3.4.9. Eigenschaften und Einsatzverhalten von Hochtemperaturfasern	414
3.4.9.1. Klassifizierung der Hochtemperaturfasern	414
3.4.9.2. Fasererzeugnisse und deren Verlegung	415
3.4.9.3. Arten und Eigenschaften	417
Literatur	427
Zusammenstellung von Standards und Normen zum Sachgebiet feuerfeste Werkstoffe	472
Sachwörterverzeichnis	490