
Wolfgang Kollenberg (Hrsg.)

Technische Keramik

Grundlagen

Werkstoffe

Verfahrenstechnik

VULKAN-VERLAG ESSEN

Inhalt

Vorwort	V
Autorenverzeichnis	VII
Einleitung	1
Wolfgang Kollenberg	
1 Struktur und Gefüge keramischer Werkstoffe	7
Wolfgang Kollenberg	
1.1 Atomaufbau der Elemente	8
1.2 Interatomare Bindungen	11
1.3 Aggregatzustände	13
1.4 Kristalline und amorphe Strukturen	14
1.4.1 Kristallgitter	14
1.4.2 Gitterfehler	17
1.5 Gefüge	18
1.6 Thermochemie	22
2 Eigenschaften und Prüfverfahren	25
Michael Dunkl, Georg Grathwohl, Holger Grote, Mathias Herrmann, Hagen Klemm, Wolfgang Kollenberg, Meinhard Kuntz, Ralph Lucke, Ralf Moos, Till Osthövenner, Teja Reetz, Jochen Schilm, Jürgen Dieter Schnapp, Michael Spillner, Mathias Woydt	
2.1 Gefügecharakterisierung	26
2.1.1 Allgemeine Verfahren der Rohstoff- und Gefügecharakterisierung	26
2.1.1.1 Allgemeines	26
2.1.1.2 Korngrößenanalyse	26
2.1.1.3 Bestimmung der spezifischen Oberfläche	27
2.1.1.4 Porosität	28
2.1.2 Mineralogische Verfahren	30
2.1.2.1 Allgemeines	30
2.1.2.2 Optische Mikroskopie	31
2.1.2.3 Rasterelektronenmikroskopie	32
2.1.2.4 Röntgenbeugungsanalyse	33
2.1.2.5 Thermische Analyse	36
2.1.3 Chemische Analytik	40
2.1.3.1 Allgemeines	40
2.1.3.2 Spektroskopische Methoden	40
2.1.3.3 Nichtspektroskopische Methoden	44
2.1.3.4 Vergleich der Verfahren	44
2.2 Mechanische Eigenschaften	45
2.2.1 Elastizität	45
2.2.1.1 Grundlagen	45
2.2.1.2 Messmethoden	48

2.2.2	Bruchmechanik	49
2.2.2.1	Allgemeines	49
2.2.2.2	Spannungsintensitätsfaktor	50
2.2.2.3	Risszähigkeit	51
2.2.2.4	Messmethoden	53
2.2.3	Festigkeit	54
2.2.3.1	Weibullverteilung	54
2.2.3.2	Messmethoden	56
2.2.3.3	Ermittlung und Darstellung der Weibull-Verteilung	58
2.2.3.4	Saumriss-Modell der Festigkeit	59
2.2.4	Unterkritisches Risswachstum	60
2.2.4.1	Allgemeines	60
2.2.4.2	Messmethoden	62
2.2.5	Kriechen	63
2.2.5.1	Grundlagen	63
2.2.5.2	Messmethoden	66
2.2.6	Härte	68
2.2.6.1	Allgemeines	68
2.2.6.2	Verfahren nach VICKERS und KNOOP	68
2.2.6.3	Spannungsverhalten und Verformung	70
2.2.6.4	Temperaturabhängigkeit	72
2.2.6.5	Zeitabhängigkeit	73
2.2.6.6	Umwelteinflüsse auf der Härte	74
2.2.7	Tribologisches Verhalten	76
2.2.7.1	Allgemeines	76
2.2.7.2	Grundlagen und Definitionen	77
2.2.7.3	Gleitreibung und -verschleiß im Trockenlauf	78
2.2.7.4	Gleitreibung und -verschleiß unter Misch- und Grenzreibung	82
2.3	Thermische Eigenschaften	86
2.3.1	Thermische Dehnung	86
2.3.1.1	Physikalische Grundlagen	86
2.3.1.2	Messmethoden	87
2.3.1.3	Anwendungsbereiche	88
2.3.2	Wärmeleitfähigkeit	89
2.3.2.1	Physikalische Grundlagen	89
2.3.2.2	Messmethoden	92
2.3.2.3	Anwendungsbereiche	95
2.4	Korrosionsbeständigkeit	96
2.4.1	Allgemeines	96
2.4.2	Gaskorrosion	97
2.4.3	Oxidation von Nichtoxiden	98
2.4.4	Korrosion in wässrigen Medien	102
2.4.5	Verträglichkeit von Keramik mit Metallen	106
2.4.5.1	Allgemeines	106
2.4.5.2	Thermodynamische und kinetische Aspekte der Verträglichkeit	106
2.4.5.3	Silicate	109
2.4.5.4	Siliciumnitrid und Siliciumcarbid	110
2.4.5.5	Sinterkorund	113
2.4.5.6	Zirconiumoxidkeramiken	113
2.4.5.7	Yttriumoxidkeramik	114
2.4.6	Verträglichkeit von Keramik mit Glasschmelzen	114
2.5	Elektrische Eigenschaften	123
2.5.1	Isolatoren	125

2.5.1.1	Isolatoren und Substrate	125
2.5.1.2	Dielektrika	126
2.5.1.3	Piezoelektrika	127
2.5.2	Halbleitende Keramiken	130
2.5.2.1	NTC-Keramiken	130
2.5.2.2	Keramische Varistoren	131
2.5.2.3	PTC-Keramiken	132
2.5.3	Keramische Ionenleiter	133
2.5.3.1	Yttrium stabilisiertes Zirconiumoxid	133
2.5.3.2	Kationenleiter	135
2.5.4	Elektrisch leitfähige Keramiken	135
2.6	Magnetische Eigenschaften	135
2.6.1	Allgemeines	135
2.6.2	Grundlagen des Magnetismus	136
2.6.3	Struktur von hart- und weichmagnetischen Ferriten	138
2.6.4	Weichmagnetische Ferritwerkstoffe für technische Anwendungen	139
2.6.5	Hartmagnetische Ferritwerkstoffe für technische Anwendungen	143
2.7	Zerstörungsfreie Prüfung	145
2.7.1	Allgemeines	145
2.7.2	Sichtprüfung	147
2.7.3	Eindringprüfung	147
2.7.4	Klangprüfung	148
2.7.5	Ultraschallverfahren	149
2.7.6	Schallemissionsprüfung	152
2.7.7	Durchstrahlungsprüfung	152
2.7.8	Thermische Verfahren	153
3	Keramische Werkstoffe	161
	Wolfgang D.G. Böcker, Dieter Brunner, Andreas Buhr, Gunter Carl, Andreas Gebhardt, Mathias Herrmann, Wolfgang Kollenberg, Johannes Liebermann, Rainer Lockegey-Lorenz, Bernhard Mussler, Ewald Pfaff, Helmut Rasch, Michael Sax, Hartmut Schneider, Dieter Sporn, Gerald Vogt	
3.1	Silicatische Technische Keramik	166
3.1.1	Einleitung	166
3.1.2	Technisches Porzellan	167
3.1.2.1	Allgemeines	167
3.1.2.2	Porzellan – der ideale Werkstoff für Hochspannungs-Isolatoren	167
3.1.2.3	Abbau der Gefügespannungen	170
3.1.2.4	Wie erreicht man eine hohe Festigkeit und ein stabiles Porzellengefüge?	171
3.1.2.5	Alterung des Porzellengefüges	173
3.1.2.6	Einfluss der Splittung auf die Festigkeit	174
3.1.2.7	Weitergehende Werkstoffentwicklungen	174
3.1.2.8	Trends und Leitlinien	176
3.1.2.9	Gefügeanalyse an verschiedenen Elektroporzellanen	184
3.1.2.10	Regeln und Richtwerte für Hersteller und Anwender	185
3.1.2.11	Einfluss von Bauform und Oberflächeneigenschaften auf das elektrische Verhalten	188
3.1.3	Steatit	188
3.1.4	Cordierit	191
3.1.4.1	Allgemeine Mineral- und Gefügeeigenschaften	191
3.1.4.2	Ausdehnungsanomalie als kristallographische Besonderheit	191
3.1.4.3	Wechselwirkungen zwischen Cordieritbildung und Werkstoffgefüge	193

Advanced Ceramics



Standardprodukte und kundenspezifisches Sortiment an Nichtoxid-Keramikpulvern.

Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001 und 14001.

H.C. Starck GmbH

Im Schleeke 78-91
38642 Goslar / Deutschland
Tel.: +49/53 21/7 51-31 35
Fax: +49/53 21/7 51-41 35
holger.enke@hcstarck.com



Bauteile aus Hochleistungskeramik nach Kundenwunsch

Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001 und 14001.

H.C. Starck Ceramics GmbH & Co. KG

Lorenz-Hutschenreuther Str. 81
95100 Selb / Deutschland
Tel.: +49/92 87/8 07-1 55
Fax: +49/92 87/8 07-4 55
stephan.kratzenstein@hcstarck.com

www.hcstarck.com

Ein  Bayer MaterialScience Unternehmen



3.1.4.4	Phasenbestand bei einer Rohstoffbasis Talk – Tonminerale – Mullit	194
3.1.4.5	Anwendungen von Cordierit	194
3.2	Oxidische Technische Keramik	197
3.2.1	Allgemeines	197
3.2.2	Aluminiumoxid	197
3.2.2.1	Einleitung	197
3.2.2.2	Industrielle Herstellung von Aluminiumhydroxid	200
3.2.2.3	Kalzination von Aluminiumhydroxid zu Aluminiumoxid	201
3.2.2.4	Charakterisierung von kalzinierten Aluminiumoxiden	204
3.2.2.5	Kalzinierte und thermisch sinterreaktive Aluminiumoxide	205
3.2.2.6	Sinterkorund	207
3.2.2.7	Schmelzkorund	208
3.2.2.8	Anwendung in der Keramikindustrie	208
3.2.3	Zirkoniumoxidkeramik	213
3.2.3.1	Einleitung	213
3.2.3.2	Natürliche Vorkommen, Verunreinigungen	214
3.2.3.3	Mikrostrukturelle Eigenschaften und Stabilisierung	214
3.2.3.4	Herstellungsverfahren	215
3.2.3.5	Praxisrelevante Zirkoniumoxidkeramiken	216
3.2.3.6	Werkstoffeigenschaften und Anwendungen von Zirkoniumoxid-Keramiken	217
3.2.3.7	Eigenschaftswerte und Anwendungen von Zirkoniumoxidkeramiken	218
3.2.4	Titanate	221

3.2.4.1	Einleitung und Überblick	221
3.2.4.2	Kristalliner Aufbau und Eigenschaften	221
3.2.4.3	Aluminiumtitanat	223
3.2.4.4	Bariumtitanat	225
3.2.4.5	Bleititanat, PZT-Keramik	225
3.2.4.6	Ferroelektrische Schichten	226
3.2.5	Mullit	226
3.2.5.1	Einleitung	226
3.2.5.2	Mullit-Feuerfestmaterialien	227
3.2.5.3	Mullit-Strukturkeramiken	228
3.2.5.4	Mullit-Schutzschichten	228
3.2.5.5	Oxidfaser/Mullitmatrix-Verbundwerkstoffe	229
3.2.5.6	Weitere Mullit-Anwendungen	229
3.3	Nichtoxidische Technische Keramik	230
3.3.1	Allgemeines	230
3.3.2	Siliciumcarbid	231
3.3.2.1	Einleitung	231
3.3.2.2	Struktur und Phasenbeziehungen	232
3.3.2.3	Eigenschaften	233
3.3.2.4	Weltmarkt und Verwendung	234
3.3.2.5	Herstellung von Siliciumcarbid	235
3.3.2.6	Chemische Bindung und Sintern	236
3.3.2.7	Werkstoffeigenschaften	240
3.3.2.8	Sonderherstellungsverfahren	242
3.3.2.9	SiC als Verstärkungsmittel	243
3.3.2.10	Großtechnische Anwendungen und Produkte	244
3.3.2.11	Anwendungen in der Halbleiterindustrie	248
3.3.2.12	Ausblick	249
3.3.3	Siliciumnitridwerkstoffe	249
3.3.3.1	Einleitung	249
3.3.3.2	Modifikationen des Siliciumnitrids	251
3.3.3.3	Oxidnitridische Phasendiagramme	254
3.3.3.4	Werkstoffherstellung	258
3.3.3.5	Gefügeentwicklung in dichter Si ₃ N ₄ -Keramik	267
3.3.3.6	Eigenschaften dichter Siliciumnitridkeramik	275
3.3.3.7	Reaktionsgebundene Si ₃ N ₄ -Werkstoffe	280
3.3.3.8	Applikation	282
3.3.3.9	Zusammenfassung / Ausblick	283
3.3.4	Aluminiumnitrid	284
3.3.4.1	Einleitung	284
3.3.4.2	Physikalische Eigenschaften	284
3.3.4.3	Vergleich mit anderen Keramiken	287
3.3.4.4	Herstellung	287
3.3.4.5	Anwendungen	289
3.4	Keramische Fasern	290
3.4.1	Allgemeines	290
3.4.2	Einsatzfelder keramischer Fasern	291
3.4.3	Stoffliche und strukturelle Varianten	293
3.4.4	Herstellung keramischer Fasern	295
3.4.5	Eigenschaftsprofile	297
3.5	Glaskeramik	299
3.5.1	Einleitung	299
3.5.2	Glasbildung und Herstellung von Glaskeramiken	300

3.5.3	Eigenschaften und Anwendungen von Glaskeramiken	303
3.5.3.1	Glaskeramiken mit minimaler thermischer Ausdehnung	303
3.5.3.2	Maschinell bearbeitbare Glaskeramiken	304
3.5.4	Bioglaskeramiken	306
3.5.5	Glaskeramiken mit ausgerichteten Kristallphasen – orientierte Glaskeramiken	308
3.5.6	Glaskeramiken mit hoher mechanischer Festigkeit	310
4	Herstellungsverfahren der Keramik	321
	Rainer Bartusch, Michael Böhmer, Ines Durmann, Herbert Gasthuber, Michael Hölzgen, Gernot Klein, Wolfgang Kollenberg, Ralf Löbe, Marcus Müller, Peter Quirnbach, Hermann Riedel, Andreas Roosen, Gerd Schwier, Wolfgang Tillmann, Gerald Vogt, Hans-Jörg Walter, Moritz von Witzleben	
4.1	Allgemeines	322
4.2	Pulverherstellung	323
4.2.1	Einleitung	323
4.2.2	Pulvereigenschaften	323
4.2.3	Pulverherstellung Allgemein	324
4.2.4	Pulveraufbereitung	327
4.2.4.1	Aluminiumoxid	328
4.2.4.2	Zirconiumoxid	330
4.2.4.3	Yttriumoxid	331
4.2.4.4	Aluminiumnitrid	332
4.2.4.5	Bornitrid	334
4.2.4.6	Siliciumnitrid	334
4.2.4.7	Titannitrid, Titancarbonitrid, Titancarbid	336
4.2.4.8	Borcarbid	336
4.2.4.9	Siliciumcarbid	338
4.2.4.10	Titanborid	339
4.2.4.11	Molybdänsilicid	340
4.3	Organische Additive	345
4.3.1	Einleitung	345
4.3.2	Additive als Bestandteil der keramischen Produktionstechnologie	345
4.3.3	Funktionalität der einzelnen Additivtypen	346
4.3.3.1	Verflüssigungs- bzw. Dispergiermittel	346
4.3.3.2	Temporäre Bindmittel	346
4.3.3.3	Presshilfsmittel	347
4.3.3.4	Gleithilfsmittel	347
4.3.3.5	Plastifizierungsmittel	347
4.3.3.6	Thermoplastische Binder	348
4.3.3.7	Feedstocks	348
4.3.3.8	Trennmittel	348
4.3.3.9	Entschäumer	349
4.3.3.10	Filtrationshilfsmittel	349
4.4	Aufbereitung	350
4.4.1	Einleitung	350
4.4.2	Mechanische Granulierverfahren	351
4.4.2.1	Aufbauagglomeration	351
4.4.2.2	Pressagglomeration	353
4.4.2.3	Wirbelschichtagglomeration	354
4.4.4	Thermische Granulierverfahren	354
4.4.4.1	Wirbelschichtgranulation	354
4.4.4.2	Sprühgranulation	355

4.4.4.3	Kneten	355
4.4.4.4	Dispergieren	355
4.5	Formgebungsverfahren	356
4.5.1	Axialpressen	357
4.5.2	Kaltisostatisches Pressen	364
4.5.2.1	Grundprinzip	364
4.5.2.2	Verfahrensprinzipien	366
4.5.2.3	Anlagentechnik	369
4.5.2.4	Anwendungsbeispiele	370
4.5.3	Heißisostatisches Pressen	371
4.5.4	Extrudieren	376
4.5.4.1	Die Arbeitsmasse	377
4.5.4.2	Die Formgebungsaggregate	379
4.5.5	Druckgießen	382
4.5.5.1	Einleitung	382
4.5.5.2	Entwicklung des Druckgießens in der keramischen Industrie	382
4.5.5.3	Physikalische Grundlagen des Druckgussprozesses	383
4.5.5.4	Anwendung der Druckgusstechnologie in der silicatischen und nichtsilicatischen Keramik	384
4.5.5.5	Beeinflussung der Scherbenbildung silicatkeramischer Suspensionen	387
4.5.5.6	Scherbenbildung beim Druckguss in der Oxid- und Nichtoxidkeramik	393
4.5.6	Spritzgießen	395
4.5.6.1	Einleitung	395
4.5.6.2	Verfahrensbeschreibung	395
4.5.6.3	Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens	401
4.5.7	Folliengießen	401
4.5.7.1	Einsatz des Verfahrens	401
4.5.7.2	Verfahrensvarianten zur Herstellung von Folien	403
4.5.7.3	Verfahrensablauf beim Foliengießen	404
4.5.7.4	Schlickerkomponenten	405
4.5.7.5	Herstellung des Schlickers und Schlickereigenschaften	410
4.5.7.6	Gießvorgang	411
4.5.7.7	Bearbeiten, Metallisieren, Laminieren	414
4.5.7.8	Binderausbrand	414
4.5.7.9	Sinterbrand	414
4.5.7.10	Zusammenfassende Bewertung des Verfahrens	415
4.6	Sintern	416
4.6.1	Einleitung	416
4.6.2	Unterscheidung verschiedener Sintermechanismen und Prozessvarianten	416
4.6.3	Festphasensintern	417
4.6.4	Flüssigphasensintern	422
4.6.5	Anwendungsbeispiele	425
4.6.5.1	Pressen und Sintern einer Dichtscheibe als Al_2O_3	426
4.6.5.2	Sintern von Tellern, Verformung durch die Schwerkraft	427
4.6.5.3	Mikrowellensintern von Al_2O_3 -Scheiben	428
4.6.6	Zusammenfassung	431
4.7	Bearbeitung	431
4.7.1	Grünbearbeitung	432
4.7.2	Hartbearbeitung	436
4.7.2.1	Technologie der Bearbeitung	436
4.7.2.2	Konventionelle Verfahren	438
4.7.2.3	Innovative Verfahren	440
4.7.2.4	Laserbearbeitung	441

4.7.2.5	Auswirkungen der Bearbeitung auf das Bauteil	442
4.7.2.6	Schleifwerkzeuge	443
4.8	Fügen	445
5	Anwendung keramischer Werkstoffe in der Technik	465
	Armin El Gammal, Hermann Hald, Wolfgang Kaysser, Wolfgang Kollenberg, Ralf Moos, Wolfgang Schulle	
5.1	Anwendung feuerfester Werkstoffe	466
5.1.1	Allgemeine Charakterisierung und Klassifizierung feuerfester Werkstoffe	466
5.1.2	Spezifische Eigenschaften feuerfester Werkstoffe	469
5.1.3	Wesentliche Anwendungsbereiche feuerfester Werkstoffe	484
5.1.3.1	Anwendungsbereich Metallurgie	485
5.1.3.2	Anwendungen in der Glas- und Keramikindustrie	504
5.1.3.3	Anwendungen in der chemischen Industrie	508
5.1.3.4	Anwendungen in allgemeinen Feuerungs- und Verbrennungsanlagen	509
5.1.3.5	Ungedrungte feuerfeste Erzeugnisse	509
5.1.3.6	Hochtemperaturwärmedämmstoffe	512
5.2	Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau	514
5.2.1	Konstruktionkeramiken im Maschinen- und Anlagenbau	515
5.2.2	Funktionskeramik	523
5.3	Elektronik	527
5.3.1	Keramischer Vielschichtkondensator	527
5.3.2	LTCC-Technologie	528
5.4	Luft- und Raumfahrt	530
5.4.1	Einleitung	530
5.4.2	Keramiken der Luft und Raumfahrt	531
5.4.3	Bauteilanwendungen in der Raumfahrt	533
5.4.3.1	Gesichtspunkte für die Gestaltung von Faserkeramik-Leichtbaukonstrukturen	534
5.4.3.2	Keramisches Thermalschutzsystem (TPS)	535
5.4.3.3	CMC-Strukturen für X-38	536
5.4.3.4	Rumpfsteuerklappen für X-38	538
5.4.3.5	Raketenschubdüsen	539
5.4.3.6	Spin-off Anwendungen für Raumfahrtkeramiken	539
5.4.4	Bauteilanwendungen in der Luftfahrt	540
5.4.4.1	Thermalschutzsysteme (TPS = Thermal Protection Systems) und Liner für Gasturbinen	541
5.4.4.2	Keramische Wärmedämmschichten auf hochbeanspruchten Turbinenteilen	544
	Stichwortverzeichnis	547
	Alphabetisches Firmenverzeichnis	553
	Lieferverzeichnis	557
	Inserentenverzeichnis	560

