

Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Hochleistungskeramiken

Herstellung, Aufbau,
Eigenschaften

Beiträge zum Abschlußkolloquium
im Schwerpunktprogramm
„Keramische Hochleistungswerkstoffe“
der Deutschen Forschungsgemeinschaft
17./18. Februar 1994, Stuttgart

Herausgegeben von Günter Petzow,
Jürgen Tobolski und Rainer Telle



Inhalt

Vorwort	v
--------------------------	---

Teil I Herstellungsverfahren keramischer Hochleistungswerkstoffe

1 Polycarbosilane-Bildung, Struktur und thermisches Verhalten	3
<i>Gerhard Fritz</i>	
1.1 Zur Aufklärung der höhermolekularen Carbosilane aus der Pyrolyse der Methylsilane	3
1.2 Das Polymere (-Me ₂ Si-CH ₂ -) _n	7
1.3 Die thermischen Veränderungen der hochmolekularen, Si-methylierten Carbosilane	7
1.4 Untersuchung zur Vernetzung linearer Polycarbosilane sowie zur Entwicklung von Modellverbindungen SiH-haltiger Polycarbosilane mit dem Ziel der Erhöhung der keramischen Ausbeute .	8
1.5 C-spiro-verbrückte Carbosilane	9
1.6 Zusammenfassung und Ausblick	10
1.7 Literatur	11
2 Synthese keramischer Materialien durch Pyrolyse ketten- und ringförmiger Silazanverbindungen	12
<i>Ralf Riedel, Uwe Klingebiel, Andreas Kienzle, Sabine Schaible</i>	
2.1 Einleitung	12
2.2 Ergebnisse	13
2.2.1 Synthese keramischer Materialien im binären System Al-N .	13
2.2.2 Synthese keramischer Materialien im ternären System Si-C-N .	14

Inhalt

2.2.3	Synthese keramischer Materialien in den quaternären Systemen Si-B-C-N und Si-B-C-O	16
2.2.4	Verarbeitung anorganischer Polymere zu keramischen Faser- und Bulk-Werkstoffen	18
2.3	Zusammenfassung und Ausblick	22
2.4	Literatur	22
3	Herstellung von Keramik und Beschichtungen auf der Basis von pyrolytisch hergestelltem Aluminiumnitrid und anderer Nitride und Carbide	24
	<i>Christian Rüssel, Ralph Zahneisen, Peter Distler, Rainer Jaschek, Michael Seibold, Irene Teusel</i>	
3.1	Einleitung	24
3.2	Herstellung der Precursoren	24
3.3	Calcinierungsverhalten	26
3.4	Sinterverhalten	28
3.5	Literatur	31
4	Untersuchungen zur Synthese von Siloxazanen als Precursoren für Siliciumoxidnitridkeramik	32
	<i>Eckhard Popowski, Andreas Harms, Henrik Junge, Ralf Riedel</i>	
4.1	Einleitung	32
4.2	Koammonolysen	33
4.2.1	Koammonolyse von $\text{Me}_3\text{SiOSiCl}_2\text{H}$ mit Me_3SiCl	34
4.2.2	Koammonolyse von $\text{Me}_3\text{SiOSiCl}_3$ mit Me_2HSiCl	35
4.2.3	Koammonolyse von $\text{ClMe}_2\text{SiOSiMe}_2\text{Cl}$ mit Me_2HSiCl	36
4.2.4	Koammonolyse von $\text{ClMe}_2\text{SiOSiMe}_2\text{Cl}$ mit MeSiHCl_2 im Molverhältnis 1:1	36
4.3	Pyrolysen	38
4.4	Zusammenfassung und Ausblick	40
4.5	Literatur	41
5	Untersuchungen zur Herstellung von Polyaromaten-Mesophase für Hochleistungs-Kohlenstoffwerkstoffe	42
	<i>Martin Bernhauer, Matthias Braun, Axel Gschwindt, Ji Ping Wang, Klaus J. Hüttlinger</i>	
5.1	Einleitung	42
5.2	Experimentelles	43

Inhalt

5.2.1	Rohstoffe	43
5.2.1.1	Pech	43
5.2.1.2	Katalysator-Ausgangsstoffe	43
5.2.1.3	Gase und Lösungsmittel	44
5.2.1.4	Analytische Methoden	44
5.2.1.5	Herstellung von sinterfähigen Pulvern	44
5.3	Ergebnisse	44
5.3.1	Kinetik der Mesphasensynthese	44
5.3.2	Mesphasensynthese in reaktiven Atmosphären	47
5.3.3	Mesphasensynthese mit Hilfe von Eisen als Katalysator	48
5.3.4	Anwendung der Mesphasen-Produkte	50
5.4	Zusammenfassung	53
5.5	Literatur	53
6	Durchstrahlungselektronenmikroskopische Untersuchungen an kohlenstofffaserverstärktem Kohlenstoff (CFC)	<i>Roland Pleger, Wolfgang Braue, Wolfgang G. J. Bunk</i> 54
6.1	Einleitung	54
6.2	Experimentelle Vorgehensweise	54
6.3	Ergebnisse und Diskussion	55
6.4	Zusammenfassung und Folgerungen	59
6.5	Literatur	62
7	Keramische Verbundwerkstoffe nach dem Reaktionspyrolyseverfahren	<i>Peter Greil, Daniel Suttor, Tobias Erny</i> 63
7.1	Einleitung	63
7.2	Verfahrensprinzip	65
7.3	Pyrolysereaktionen	66
7.4	Porosität und Füllerumsetzung	68
7.5	Füllerumsetzung und Schrumpfung	71
7.6	Zusammenfassung	73
7.7	Literatur	74

Inhalt

8	Iso- und Heteropolyverbindungen als Vorprodukte für mehrkomponentige Oxidkeramiken	75
	<i>Hedda Görz, Bernd Matthes</i>	
8.1	Einleitung und Zielstellung	75
8.2	Iso- und Heteropolyverbindungen des Vanadiums	76
8.2.1	Ammoniumdecavanadat	76
8.2.2	Weitere Polyvanadate	76
8.2.3	Strontiumdecavanadat	77
8.2.4	Strontium- und Bariumvanadate(IV)	77
8.3	Iso- und Heteropolyverbindungen des Niobs	78
8.3.1	Magnesiumniobat	78
8.3.2	Strontium- und Bariumniobate	79
8.3.3	Bleiniobate	79
8.3.4	Blei-Barium-Niobate	79
8.3.5	Dodecaniobomanganate	79
8.4	Zusammenfassender Überblick	80
8.5	Schlußfolgerungen	80
8.6	Literatur	81
9	Herstellung komplexer Niobate mit Perowskitstruktur aus C-haltigen Precursoren	82
	<i>Hubert Langbein, Roswitha Wenzel, Beate Balzer</i>	
9.1	Einführung	82
9.2	Herstellung und Charakterisierung der Precursoren	83
9.3	Untersuchungen zur Phasenausbildung	85
9.4	Diskussion der Ergebnisse	88
9.5	Literatur	89
10	Mehrkomponentige Oxidkeramik aus Iso- und Heteropolyverbindungen	90
	<i>Günter Werner, Kathrin Ehrhardt</i>	
10.1	Überblick	90
10.2	Polyverbindungen	91
10.3	Niobate	91
10.3.1	Herstellung über Polyverbindungen	91
10.3.1.1	SrNb_2O_6 , BaNb_2O_6	92
10.3.1.2	MgNb_2O_6	93
10.3.2	Mixed-oxide-Verfahren	94

Inhalt

10.4	Strontiumvanadat	94
10.4.1	Herstellung über Polyverbindung	94
10.4.2	Herstellung nach dem mixed-oxide-Verfahren	95
10.5	Zusammenfassung und Schlußfolgerung	96
10.6	Literatur	97
11	Der Sol-Gel-Weg zu hochdispersen Metallen in Oxid-Matrizes	98
	<i>Ulrich Schubert, Claus Görsmann, Stefan Tewinkel, Hermann Buhler, Boris Breitscheidel</i>	
11.1	Einleitung	98
11.2	Herstellung von Metall(oxid)/SiO ₂ -Kompositen über den Sol-Gel-Prozeß	99
11.3	SIMIT-Materialien	102
11.4	Katalysatoren	103
11.5	Metall/TiO ₂ -Komposite	105
11.6	Ausblick	107
11.7	Literatur	107
12	Strukturuntersuchungen an Vor- und Zwischenstufen im Sol-Gel-Prozeß zur Herstellung von Blei-Zirkonat-Titanat .	109
	<i>Dieter Gutwerk, Uwe Kolb, Brigitte Friedrich, Dietmar Peter, Helmut Bertagnolli</i>	
12.1	Einleitung	109
12.2	Ausgangsverbindungen	110
12.2.1	Zirkon- und Titanalkoholate	110
12.2.1.1	Titan- <i>n</i> -propylat	110
12.2.1.2	Zirkon- <i>n</i> -propylat	111
12.2.1.3	Titan- <i>n</i> -propylat/Zirkon- <i>n</i> -propylat-Gemisch	112
12.2.1.4	Zirkon- <i>n</i> -propylat/Essigsäure	112
12.2.1.5	Titan- <i>n</i> -propylat/Zirkon- <i>n</i> -propylat/Essigsäure	112
12.2.1.6	Zirkon- <i>n</i> -butylat/Acetylacetone	113
12.2.2	Bleiverbindungen	114
12.2.2.1	Bleiacetat in alkoholischer Lösung	114
12.3	Sol, Gel	116
12.4	Pyrolyse und Kristallisation	117
12.5	Literatur	119

Inhalt

13	Herstellung und Eigenschaften feindisperser Magnesiumoxid-Pulver für den keramischen Prozeß	121
	<i>Hartmut Jost, Christine Carius</i>	
13.1	Einführung	121
13.2	Herstellung der MgO-Pulver	121
13.3	Ergebnisse und Diskussion	122
13.4	Zusammenfassung	129
13.5	Literatur	129
14	Chemische Aspekte des Sol-Gel-Prozesses bei der Herstellung von Zinnsteinkeramiken	130
	<i>Hans Reuter, Martin Jansen, Dirk Schröder, Michael Kremser</i>	
14.1	Einleitung	130
14.2	Precursoren	131
14.3	Strukturelle Entwicklung in Lösung	132
14.4	Gel	133
14.5	Reaktionen im Festkörper	134
14.6	Keramik	135
14.7	Literatur	136
15	Modifizierung von Siliciumnitridpulver durch Beschichtung mit den oxidischen Sinteradditiven	138
	<i>Hans-Jürgen Richter, Waldemar Hermel</i>	
15.1	Einleitung	138
15.2	Experimentelles	139
15.3	Ergebnisse und Diskussion	139
15.4	Schlußfolgerungen	144
15.5	Literatur	144
16	Untersuchung einer neuartigen Methode zum Additiveintrag. Einfluß der Sinteratmosphäre auf die Keramikeigenschaften	146
	<i>Günter Werner, Rosemarie Dittrich, Grit Hüttl</i>	
16.1	Einleitung, Zielstellung	146
16.2	Versuchsdurchführung	147
16.3	Ergebnisse	148

Inhalt

16.4	Einfluß der Ofenatmosphäre auf die Sinterung von AlN	151
16.5	Ergebnisse	152
16.6	Zusammenfassung	153
16.7	Literatur	154
17	Elektrophoretische Abscheidung von submicron-SiC-Pulvern mit partikulären Sinteradditiven aus nichtwässrigen Schlickern	155
	<i>Rainer L. Meisel, Rüdiger Naß, Helmut Schmidt</i>	
17.1	Einleitung und Problemstellung	155
17.2	Experimentelle Ergebnisse	156
17.3	Literatur	160
18	Ionenstrahlmethoden und Hochleistungskeramik. Materialanalyse, Defekterzeugung und strahlungsinduziertes Sintern am Beispiel von Siliziumkarbid	161
	<i>Albrecht Föhl, Heinz D. Carstanjen</i>	
18.1	Einleitung	161
18.2	Charakterisierung der SiC-Proben	162
18.2.1	Schwere Fremdatome	162
18.2.2	Sauerstoffgehalt der Proben und Möglichkeiten zu seiner Verringerung	163
18.3	Ionenimplantation und Schädigung	163
18.3.1	Abhängigkeit der Schädigung von der Ionenenergie	163
18.3.2	Dosisabhängigkeit der Schädigung	164
18.3.3	Ausheilverhalten der Defekte	164
18.4	Ionenstrahlinduziertes Sintern von SiC	166
18.5	Literatur	171
19	Sinterphänomene von rekristallisiertem Siliziumkarbid und Aspekte für die Prozeßtechnik	172
	<i>Jochen Kriegesmann</i>	
19.1	Einführung	172
19.2	Sinterphänomene	173
19.3	Aspekte für die Prozeßtechnik	178
19.4	Literatur	180

Inhalt

20	Reaktionsbinden von Aluminiumoxid (RBAO). Herstellung, Mechanismen und Eigenschaften	181
	<i>Dietmar Holz, Suxing Wu, Rolf Janssen, Nils Claussen</i>	
20.1	Einleitung	181
20.2	Herstellung	181
20.3	Mechanismen	183
20.4	RBAO-Modifikationen	185
20.5	Zusammenfassung	187
20.6	Literatur	188
 Teil II Mechanische Eigenschaften keramischer Hochleistungswerkstoffe		
1	Modellierung des Bruchverhaltens keramischer Verbundwerkstoffe	191
	<i>Rudolf R. H. Dittrich, Wolfgang S. Kreher</i>	
1.1	Einleitung	191
1.2	Theoretische Grundlagen	192
1.3	Auswahl von Ergebnissen der Computer-Experimente	194
1.4	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	199
1.5	Literatur	200
2	Bruchkriterien bei überlagerter Rißöffnung Mode I, Mode III in keramischen Werkstoffen	201
	<i>Karl-F Fischer, Frank Fischer</i>	
2.1	Einleitung	201
2.2	Energiefreisetzungsräte bei überlagerter Beanspruchung	202
2.3	Energiedichteverteilung bei überlagerter Beanspruchung	203
2.4	Berücksichtigung der Mikrostützwirkung	204
2.5	Einbeziehung des bruchmechanischen Anstrengungsverhältnisses	206
2.6	Bruchflächenuntersuchungen an Si ₃ N ₄ -Proben	207
2.7	Zusammenfassung	209
2.8	Literatur	209

Inhalt

3	Einfluß keramischer Verstärkungselemente auf das Kriechverhalten von Oxidkeramiken und Glas	211
	<i>Claus von Minden, Heinz Hübner</i>	
3.1	Einleitung	211
3.2	Werkstoffe und ihre Charakterisierung	211
3.3	Ergebnisse und Diskussion	214
3.3.1	Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur	214
3.3.2	Kriechverhalten	215
3.3.2.1	TZP-Matrix	215
3.3.2.2	Aluminiumoxid-Matrix	216
3.3.2.3	Glas-Matrix	218
3.4	Zusammenfassung	220
3.5	Literatur	221
4	Hochfeste Keramiken auf Al₂O₃- und ZrO₂-Basis durch kontrollierte Korngrenzenstrukturen	223
	<i>Andreas Krell, Jürgen Seidel, Nils Claussen</i>	
4.1	Einführung	223
4.2	Abschätzung erreichbarer Effekte – Möglichkeiten zur strukturellen Einflußnahme	224
4.3	Experimentelles	226
4.4	Ergebnisse	227
4.5	Schlußfolgerungen	230
4.6	Literatur	231
5	Bruchfestigkeit, Bruchzähigkeit und Verlässlichkeit von metallverstärktem Al₂O₃	233
	<i>Mathias Knechtel, Helge Prielipp, Jürgen Rödel, Nils Claussen</i>	
5.1	Einführung	233
5.2	Bruchmechanik metallverstärkter Keramik	233
5.3	Experimentelle Durchführung	234
5.4	Ergebnisse und Diskussion	235
5.4.1	Bruchzähigkeit	235
5.4.2	Bruchfestigkeit	235
5.4.3	Verlässlichkeit	239
5.5	Literatur	240

Inhalt

6	Der Einfluß von Inhomogenitäten auf Verzug, Rißbildung und Eigenspannungen beim Sintern keramischer Werkstoffe	241
	<i>Hermann Riedel, Hannes Zipse, Markus Hennies, Dieter Meyer</i>	
6.1	Einleitung und Zielsetzung	241
6.2	Theorie: mechanische Stoffgesetze für das Sintern	242
6.2.1	Ein Modell mit sechseckigen Körnern	242
6.2.2	Eine Bemerkung zum Parameter m	243
6.2.3	Weitere Arbeiten zur Modellbildung	244
6.3	Versuche	244
6.3.1	Probenherstellung	244
6.3.2	Reibungsmessung	244
6.3.3	Aufbau des Sinterumformversuchs	245
6.3.4	Auswertung der Meßergebnisse	246
6.3.5	Ergebnisse	246
6.4	Vergleich der Ergebnisse mit Modellen und Diskussion	248
6.4.1	Sintergeschwindigkeit	248
6.4.2	Kompressionsviskosität	249
6.4.3	Sinterspannung	250
6.4.4	Verhältnis aus Scher- und Kompressionsviskosität	251
6.5	Numerische Simulation	251
6.5.1	Reibahle aus Hartmetall	251
6.5.2	Scheibe mit konusförmiger Aussparung	252
6.6	Literatur	253
7	Bruchverhalten von Si₃N₄ unter überlagerter Biegung und Torsion bei Raumtemperatur	254
	<i>Wolfgang Brocks, Etienne Krämer, Jürgen Mohn, Peter Reimers, Edith Rudolph, Johannes Thaten</i>	
7.1	Ziel	254
7.2	Werkstoffcharakterisierung	254
7.3	Proben	256
7.4	Prüfmittel	256
7.5	Experimente	259
7.6	Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren	260
7.7	Ergebnisse	263
7.8	Literatur	263

Inhalt

8	Dynamisches und zyklisches Ermüdungsverhalten von SYALON®-Keramiken	264
	<i>Marion Bartsch, Jürgen Göring, Horst Nowack, Hartmut Schneider</i>	
8.1	Werkstoffe	264
8.2	Proben und Versuchsdurchführung	265
8.3	Bruchauslöser	265
8.4	Verhalten in dynamischen Biegeversuchen	268
8.5	Verhalten bei zyklischer Beanspruchung	270
8.6	Zyklische Rißausbreitung	271
8.7	Fraktografische Analyse der Bruchflächen	271
8.8	Nachwort	273
8.9	Literatur	275
9	Untersuchungen zum Wachstum mikroskopischer und makroskopischer Risse unter zyklischer Belastung im Zirkonoxid	276
	<i>Ruben Schmitt, Theo Fett, Dietrich Munz</i>	
9.1	Problemstellung	276
9.2	Bruchmechanische Zusammenhänge	277
9.2.1	Lebensdauervorhersage für zyklische Belastung	277
9.2.2	Auswertemethode für zyklische Lebensdauermessungen bei natürlichen Fehlern	278
9.3	Durchgeführte Experimente	279
9.4	Ergebnisse	279
9.4.1	Natürliche Fehler	279
9.4.2	Makroskopische Risse	283
9.4.3	Vergleich zwischen natürlichen Fehlern und makroskopischen Rissen	285
9.5	Zusammenfassung	285
9.6	Literatur	286

Inhalt

10	Nachweis mechanisch induzierter Strukturänderungen bei Druck- bzw. Biegebelastung hochkorundhaltiger Werkstoffe mit Hilfe der Elektronenspinresonanz	287
	<i>Reinhard Stößer, Rudolf Brenneis, Werner Herrmann, Norbert Steinfeldt</i>	
10.1	Einleitung	287
10.2	Herstellung der schmelzgegossenen Modellwerkstoffe und Aufnahme der ESR-Spektren	289
10.3	Simulation der ESR-Spektren von Fe ³⁺ -Ionen in ungeordneten und partiell geordneten Proben	290
10.4	Nachweis mechanisch induzierter Strukturänderungen anhand der Änderungen spektraler Eigenschaften	292
10.5	ESR-Untersuchungen bei tiefen und hohen Temperaturen	293
10.6	ESR-Tomographie	296
10.7	Zusammenfassung	297
10.8	Literatur	297

Teil III Funktionskeramiken

1	Zusammenhang zwischen Normalleitfähigkeit und Supraleitung in oxidischen Keramiken	301
	<i>Hellmuth Fischer, Karl-Heinz Härdtl</i>	
1.1	Einleitung	301
1.2	Präparation und Charakterisierung	302
1.3	Meßergebnisse	303
1.3.1	Leitfähigkeitsverhalten unterhalb Raumtemperatur	305
1.3.2	Leitfähigkeitsverhalten bei hohen Temperaturen	306
1.3.3	Thermogravimetrische Untersuchungen	308
1.4	Diskussion	310
1.5	Literatur	313
2	Defektchemie und Massetransport in Hochtemperatursupraleitern	314
	<i>Mario Quilitz, Gösta Pfundtner, Joachim Maier</i>	
2.1	Einleitung	314
2.2	Experimentelles	315

Inhalt

2.3	Thermodynamik: Korrelation der Ladungsträgerkonzentrationen mit Temperatur, Partialdruck und Orientierung	316
2.4	Kinetik: Sauerstofftransport in den Hochtemperatursupraleitern	319
2.5	Literatur	322
3	Untersuchungen zur Ionenleitfähigkeit chemisch stabiler, fester Mischoxidelektrolyte bei 1000 bis 1600 °C	323
	<i>Axel Weyl, Dieter Janke</i>	
3.1	Einleitung und Aufgabenstellung	323
3.2	Auswahl und Vorstellung geeigneter Festelektrolyte	324
3.3	Vorstellung der Meßmethoden	326
3.3.1	EMK-Polarisationsmethode	327
3.3.2	Thermodynamische EMK-Methode	327
3.4	Experimentelle Untersuchungen	328
3.4.1	Sondentypen	328
3.4.2	Diffaktometeraufnahmen	329
3.5	Ergebnisse	329
3.6	Zusammenfassung	332
3.7	Literatur	332
4	Alterung ferroelektrischer Keramiken	334
	<i>Gottfried Arlt, Ulrich Robels</i>	
4.1	Einführung	334
4.2	Inneres Feld	335
4.3	Alterung der Dielektrizitätszahl	338
4.4	Altern der Nichtlinearität der Dielektrizitätszahl	341
4.5	Literatur	344
5	Inversionsdomänen und Wärmeleitfähigkeit von AlN-Keramiken	345
	<i>Gabriele Gorzawski, Gerd Müller, Wolfgang F Müller, Orlow Massler, Kai-Uwe Senftleben, Hans-Georg Sockel</i>	
5.1	Einleitung	345
5.2	Experimentelles	346
5.3	Ergebnisse und Diskussion	347

Inhalt

5.3.1	Bildung und Wachstum der Inversionsdomänen	347
5.3.1.1	Bildung der Inversionsdomänen an Versetzungen	347
5.3.1.2	Wachstum der Inversionsdomänen	348
5.3.2	Sauerstoffnachweis an den Inversionsdomänengrenzen	351
5.3.3	Abhängigkeit der Inversionsdomänen von den Prozeßparametern	352
5.3.4	Auswirkung der Inversionsdomänen-Häufigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit	353
5.4	Zusammenfassung	354
5.5	Literatur	355
6	Funktionskeramik in Schicht-Verbundtechnik	356
	<i>Bernd Hoffmann, Dirk Schmid</i>	
6.1	Einleitung	356
6.2	Experimentelles	357
6.3	Ergebnisse	358
6.3.1	Korngröße der Ausgangssubstanzen in Abhängigkeit von der Mahldauer	358
6.3.2	Das Sinterverhalten der feingemahlenen Titanate	359
6.3.3	Das thermische Ausdehnungsverhalten von Barium/Strontium-Titanat-Keramik	360
6.3.4	Untersuchungen zur Rißbildung	362
6.4	Ausblick	363
6.5	Literatur	364
7	Herstellung funktionskeramischer Werkstoffe durch Mikrowellenpyrolyse und Mikrowellensintern	365
	<i>Monika Willert-Porada, Torsten Gerdes</i>	
7.1	Einleitung	365
7.2	Experimentelles	369
7.2.1	Pulversynthese	369
7.2.2	Sintern	369
7.3	Ergebnisse und Diskussion	371
7.3.1	Pulverherstellung durch Mikrowellenpyrolyse von Prekursoren	371
7.3.2	Mikrowellensintern	375
7.4	Zusammenfassung	377
7.5	Literatur	378

Inhalt

Teil IV Struktur und Eigenschaften von ZrO₂

1	Strukturen und Eigenschaften von Zirkonia (TZP, CSZ)	383
	<i>Friedrich Frey, Hans Boysen, Uwe Martin, Marjan Tadin</i>	
1.1	Einleitung	383
1.2	Experimentelles, Auswertung	384
1.3	Ergebnisse	385
1.3.1	Struktur und Ionenleitung in TZP im Vergleich zu CSZ	385
1.3.2	Tetragonalität und Stabilität von TZP	385
1.3.3	Wassereinlagerung in TZP	388
1.3.4	Ultrafeine Zirkonia-Pulver	390
1.3.5	Vergleichende Untersuchungen an isotypem CeO ₂	391
1.4	Literatur	392
2	Stabilitätsuntersuchungen an TZP	393
	<i>Olaf Kruse, Nikolaus Pazarkas, Paris Wilhelm Kountouros, Heinz D. Carstanjen, Helmut Schubert</i>	
2.1	Einleitung	393
2.2	Stabilität von TZP	394
2.3	Experimentelles	395
2.4	Ergebnisse	396
2.5	Literatur	400
3	Der Einfluß von Dotierungen auf die Stabilität der ZrO₂-Modifikationen	402
	<i>Horst Philipp Beck, Claus Kaliba, Anton Reichert, Herbert Müller</i>	
3.1	Einleitung	402
3.2	Ausmaß und Wirkung der Dotierung mit Fremdkationen	403
3.3	Dotierungen und Sintereigenschaften	405
3.4	Die m-t-Transformation bei reinem und dotiertem ZrO ₂	407
3.5	Hochdruckuntersuchungen	409
3.6	Literatur	412

Inhalt

4	Atomare Fehlstellen in Zirkondioxid	413
	<i>Manfred Weller</i>	
4.1	Einleitung	413
4.2	Experimentelle Methoden	415
4.2.1	Temperaturabhängigkeit der Ionenleitung	415
4.2.2	Mechanische und dielektrische Verluste	416
4.3	Messungen an Zirkondioxid	417
4.3.1	Mechanische und dielektrische Verluste von TZP	418
4.3.2	Mechanische Verlustmessungen an kubischem ZrO ₂ -10-Mol-% Y ₂ O ₃	422
4.4	Schlußfolgerungen	424
4.5	Literatur	424
5	Elektronische Minoritätsleitung in reinen und dotierten tetragonalen Zirconia-Polykristallen	426
	<i>Werner Weppner</i>	
5.1	Einleitung	426
5.2	Experimentelle Aspekte	428
5.3	Ergebnisse	429
5.4	Diskussion	433
5.5	Literatur	434
6	Optimierung der Sauerstoffionenleitfähigkeit von Zirkondioxid	436
	<i>Henning Dannheim, Angela Engel</i>	
6.1	Einleitung	436
6.2	Probenherstellung	436
6.3	Elektrische Messungen	437
6.4	Gefüge und Phasenbestand	440
6.5	Literatur	443

Inhalt

7	Atomare Fehlstellen in Metalloxiden und SiC-Positronen als Sonden	444
	<i>Hans-E. Schaefer, Martin Forster, Martin A. Müller, Andrew A. Rempel</i>	
7.1	Einleitung	444
7.2	Einfache atomare Fehlstellen nach Bestrahlung, deren Wanderung und Agglomeration	445
7.3	Fehlstellenbildung bei hohen Temperaturen	448
7.4	Literatur	450
 Teil V Analytik von keramischen Materialien		
1	Atomspektrometrische Methoden für die Spurenanalytik von Hochleistungskeramiken	455
	<i>José A. C. Broekaert, Peter Tschöpel, Günther Tölg</i>	
1.1	Einleitung	455
1.2	Experimentelles	456
1.2.1	Analyse von keramischen Pulvern nach Aufschluß	456
1.2.2	Suspensionsmethode	458
1.2.3	Einsatz der ICP-MS	460
1.3	Ergebnisse und Diskussion	460
1.4	Wege zur Direktanalyse kompakter Keramiken	462
1.5	Ausblick	464
1.6	Literatur	465
2	Neutronenaktivierungsanalytische und atomspektrometrische Verfahren zur Analyse keramischer Materialien	466
	<i>Viliam Krivan, Peter Barth, Bohumil Docekal, Martin Franek, Christian Friese, Susanne Hauptkorn, Thomas Römmelt, Germar Schneider, Dieter Wildhagen</i>	
2.1	Einleitung	466
2.2	Neutronenaktivierungsanalytische Methoden	467
2.3	AAS-, ICP-AES- und ICP-MS-Verbundverfahren	470
2.4	Suspensionstechnik – ETAAS	472
2.5	Literatur	475

Inhalt

3	Verbesserte Charakterisierung undotierter und dotierter Si₃N₄-Pulver	476
	<i>Gerhard Nabert, Hans Schmidt, Günter Ziegler</i>	
3.1	Einleitung	476
3.2	Experimentelle Durchführung	478
3.3	Ergebnisse	479
3.3.1	Transmissionselektronenmikroskopie	479
3.3.2	XPS- und Tiefenprofilanalyse	484
3.3.3	FT-IR-Untersuchungen	486
3.4	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	487
3.5	Literatur	489

Teil VI Gläser

1	Zur Kinetik der Sinterung und Kristallisation von Glas- und Sol-Gel-Pulvern der Cordierit-Zusammensetzung	493
	<i>Ralf Müller, Horst Fischer, Dieter Sporn, Helmut Bertagnolli</i>	
1.1	Einleitung	493
1.2	Experimentelles	494
1.3	Untersuchungen zur Kristallisation	495
1.3.1	Glaspulver	495
1.3.2	Sol-Gel-Pulver	496
1.4	Theorie	496
1.4.1	Der Faktor s _o (T,t)	497
1.4.2	Der Faktor 1-x(T,t)	498
1.4.3	Die Berechnung von s(T,t)	498
1.5	Diskussion	499
1.5.1	Glaspulver	499
1.5.2	Sol-Gel-Pulver	500
1.6	Ausblick	501
1.7	Literatur	502

Inhalt

2	Unidirektionale Kurzfaserverstärkung von Gläsern mittels Strangpressen und Untersuchung ihrer charakteristischen Eigenschaften	503
	<i>Erwin Roeder, Hans-Joachim Mayer</i>	
2.1	Einleitung	503
2.2	Herstellung kurzfaserverstärkter Glasverbunde durch das Strangpreßverfahren	504
2.3	Strukturelle Untersuchungen der Verbundkörper	505
2.4	Ermittlung mechanischer Eigenschaften der Verbundkörper	506
2.5	Zusammenfassung	511
2.6	Literatur	511
3	Aushärtung maschinell bearbeitbarer Glimmerglaskeramiken	513
	<i>Michael Reise, Gerd Müller</i>	
3.1	Einführung und Zielsetzung	513
3.1.1	Das System Phlogopit-Anorthit	514
3.1.2	Das System Phlogopit-ZrO ₂	514
3.2	Experimentelles	515
3.3	Ergebnisse	516
3.3.1	Das System Phlogopit-Anorthit	516
3.3.2	Das System Phlogopit-ZrO ₂	520
3.4	Zusammenfassung und Ausblick	523
3.5	Literatur	523

Teil VII Bearbeitung von Hochleistungskeramiken

1	Eigen- und Lastspannungen in ein- und zweiphasigen keramischen Werkstoffen nach unterschiedlichen Bearbeitungen	527
	<i>Bernd Eigenmann, Eckard Macherauch</i>	
1.1	Einleitung	527
1.2	Untersuchungsmaterial und Versuchsdurchführung	528
1.3	Versuchsergebnisse	529
1.3.1	Bearbeitungseigenspannungen	529
1.3.2	Überlagerung von Bearbeitungseigenspannungen und Lastspannungen	533

Inhalt

1.4	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	537
1.5	Literatur	538
2	Bearbeitungsbedingte Defektstrukturen und mikrostrukturelle Ursachen der Ermüdung von Hochleistungskeramiken	540
	<i>Georg Grathwohl</i>	
2.1	Einleitung	540
2.2	Zielsetzung	541
2.3	Experimentelle Methoden	541
2.4	Ergebnisse	545
2.4.1	Festigkeit	545
2.4.2	Rißwiderstand	547
2.4.3	Ermüdung	549
2.5	Schlußfolgerungen	554
2.6	Literatur	555
3	Einfluß der Werkstoffeigenschaften und des Herstellprozesses auf die Spanbildung- und Abtragsmechanismen bei der spanenden Bearbeitung keramischer Hochleistungswerkstoffe	556
	<i>Hans K. Tönshoff, Hans-Günter Wobker, Peter Roth, Tjark Lierse</i>	
3.1	Einleitung	556
3.2	Werkstoffe	557
3.3	Einkornritzversuche zur Modellierung des Schneideneingriffs	558
3.4	Schleifbearbeitung	561
3.5	Charakterisierung des Randzonenzustands geschliffener Keramiken	564
3.6	Literatur	565
4	Einfluß der Werkstoffbeschaffenheit von Hochleistungskeramiken auf die Anwendbarkeit des Röntgenbeugungsverfahrens	566
	<i>Hans K. Tönshoff, Eckard Brinksmeier, Hans-Günter Wobker, Heike Seibt, Ines Oberbeck</i>	
4.1	Einleitung	566
4.2	Die röntgenographische Eigenspannungsanalyse	567
4.2.1	Grundlagen	567
4.2.2	Gitterdehnungsverteilungen an bearbeiteten Keramiken	568

Inhalt

4.2.3	Oberflächenspannungen und Spannungstiefenverläufe	571
4.3	Literatur	573
5	Spanbildungsmechanismen und Randzonenschädigung bei der Hartbearbeitung von Al₂O₃-Keramiken mit variierter Korngröße	574
	<i>Rainer Telle, Sang-Hei Park</i>	
5.1	Einleitung	574
5.2	Experimentelle Durchführung	575
5.2.1	Ausgangsmaterial	575
5.2.2	Probenherstellung und Charakterisierung	575
5.2.3	Oberflächenbearbeitung	576
5.3	Ergebnisse	576
5.3.1	Gefügeentwicklung	576
5.3.2	Mechanische Eigenschaften	576
5.3.3	Materialabtrag und Randzonenschädigung durch Oberflächen- bearbeitung	579
5.4	Diskussion	584
5.5	Schlußfolgerungen	587
5.6	Literatur	588
6	Beeinflussung des Honprozesses durch die Zusammensetzung und die Eigenschaften keramischer Werkstoffe	589
	<i>Günter Spur, Uwe-Peter Weigmann</i>	
6.1	Einleitung und Problemstellung	589
6.2	Versuchsplanung und Versuchsbedingungen	590
6.3	Honbarkeit keramischer Werkstoffe	592
6.4	Untersuchungen an Aluminiumoxid	595
6.4.1	Charakterisierung der untersuchten Werkstoffe	595
6.4.2	Einfluß der Bearbeitungsbedingungen auf das abgetrennte Werkstoffvolumen	596
6.4.3	Einfluß der Bearbeitungsbedingungen auf die Oberflächenausbildung	596
6.4.4	Ansatz zur analytischen Beschreibung des Abtrennverhaltens	600
6.5	Zusammenfassung und Ausblick	601
6.6	Literatur	602

Inhalt

Teil VIII Aufbau und Eigenschaften spezieller Hochleistungskeramiken

1	Thermodynamische Optimierung des Systems B-C-Si und seiner Randsysteme	605
	<i>Sung-Ki Lim, Hans Leo Lukas</i>	
1.1	Einleitung	605
1.2	Experimentalwerte aus der Literatur	606
1.3	Modellierung der Phasen	608
1.4	Optimierungsrechnung	609
1.5	Ergebnisse	610
1.6	Literatur	615
2	Binäre und ternäre Nitride	617
	<i>Herbert Jacobs</i>	
2.1	Einleitung	617
2.2	Binäre Nitride von Mn, Fe und Ni	617
2.3	Ternäre Nitride mit Alkali- und Erdalkalimetallen	619
2.4	Aluminiumnitrid	621
2.5	Siliciumnitrid	624
2.6	Schlußbetrachtung	625
2.7	Literatur	625
3	Konstitutionsuntersuchungen im System Nd-Si-Al-O-N	627
	<i>Arno Kaiser, Hans-Jürgen Richter, Mathias Herrmann, Waldemar Hermel</i>	
3.1	Einleitung	627
3.2	Experimentelles	628
3.3	Ergebnisse und Diskussion	628
3.3.1	System Nd ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -SiO ₂	628
3.3.2	Thermodynamische Berechnungen	630
3.4	Schlußfolgerungen	633
3.5	Literatur	634

Inhalt

4	Reaktionsgrenzschichten auf Si-Al-O-N-Basis zum Fügen von SiC	636
	<i>Andreas Hesse, Hans W. Hennicke †</i>	
4.1	Einführung	636
4.2	Theoretische Grundlagen	637
4.3	Experimentelles	638
4.3.1	SiC-Keramiken	638
4.3.2	Beschichten	638
4.3.3	Fügen	640
4.3.4	SiAlON-Synthese	640
4.3.5	Charakterisierung der Fügenart	640
4.4	Ergebnisse	642
4.5	Schlußfolgerungen	648
4.6	Literatur	649
5	Viskoelastizität einer glasphasehaltigen Keramik bei Hochtemperatur	650
	<i>Herwig Peterlik, Karl Kromp</i>	
5.1	Einführung	650
5.2	Material und Versuchsaufbau	651
5.3	Rißzähigkeit in der LEBM und im Viskoelastizitätsmodell	651
5.4	Ergebnisse und Diskussion	653
5.5	Zusammenfassung	657
5.6	Literatur	658
6	Untersuchungen zur superplastischen Umformbarkeit keramischer Werkstoffe mit feinkristalliner äquiaxialer Mikrostruktur	659
	<i>Georg Frommeyer, Angela Dirks-Eicken</i>	
6.1	Einleitung	659
6.2	Grundlagen der Superplastizität	660
6.3	Probenherstellung	661
6.4	Konstitution	662
6.5	Superplastische Eigenschaften	664
6.6	Verformungsanalyse	667

Inhalt

6.7	Zusammenfassung	669
6.8	Literatur	669
7	Untersuchung der Homogenität der Anordnung von ZrO₂-Teilchen in Al₂O₃-Keramiken mittels Bildverarbeitung	670
	<i>Horst Wendrock, Roland Hübel</i>	
7.1	Einleitung	670
7.2	Materialien	670
7.3	Vorgehensweise	671
7.4	Teilchenmodelle	673
7.5	Beschreibung der Methoden	674
7.6	Ergebnisse	676
7.7	Zusammenfassung	678
7.8	Literatur	679

Anhang

1	Mitglieder des Programmausschusses zur Initiierung des Schwerpunktprogramms	683
2	Mitglieder der Prüfungsgruppe	684
3	Ständige Gäste	686
4	Anschriften der Autoren	687