

# Inhalt

<b>1 Aufbau, Eigenschaften und Herstellung der Werkstoffe der Konstruktionskeramik . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung und Definition . . . . .	1
1.2 Eigenschaften der Konstruktionskeramik bei Raumtemperatur . . . . .	4
1.3 Temperaturverhalten . . . . .	14
1.4 Werkstoffherstellung . . . . .	18
1.4.1 Technologische Stadien keramischer Werkstoffe . . . . .	18
1.4.1.1 Pulverherstellung und -aufbereitung . . . . .	18
1.4.1.2 Formgebung . . . . .	19
1.4.1.3 Sintern . . . . .	21
1.4.2 Spezielle Werkstoffe . . . . .	23
1.4.2.1 Aluminiumoxid . . . . .	23
1.4.2.2 Zirkondioxid . . . . .	24
1.4.2.3 Siliziumnitrid . . . . .	25
1.4.2.4 Siliziumkarbid . . . . .	30
1.5 Entwicklungstendenzen . . . . .	33
1.6 Kurzzeichenverzeichnis zu Kapitel 1 . . . . .	38
<b>2 Bewertung der Bauteile hinsichtlich Festigkeit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit . . . . .</b>	<b>39</b>
2.1 Einleitung . . . . .	39
2.2 Bewertung keramischer Bauteile . . . . .	39
2.3 Theoretische Grundlagen . . . . .	40
2.3.1 Bruchkriterien . . . . .	41
2.3.1.1 Linear elastisches Werkstoffverhalten . . . . .	41
2.3.1.2 Nichtlineares Werkstoffverhalten . . . . .	43
2.3.2 Rißwachstumsgleichungen . . . . .	43
2.3.2.1 Rißwachstum bei quasistatischer Schädigung . . . . .	43
2.3.2.2 Rißwachstum bei zyklischer Schädigung . . . . .	47
2.3.3 Bruchstatistik . . . . .	48
2.3.4 SPT-Diagramme . . . . .	51
2.3.5 Proof-Test-Konzept . . . . .	53
2.4 Nachweis von Kurzzeitfestigkeit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit . . . . .	54
2.4.1 Vorbemerkungen . . . . .	54
2.4.2 Kurzzeitfestigkeitsnachweis . . . . .	55

2.4.3	Lebensdauernachweis . . . . .	55
2.4.4	Zuverlässigenachsweis . . . . .	56
2.4.5	Komplexer Nachweis / SPT-Diagramm . . . . .	56
2.4.6	Sonstige Nachweise . . . . .	57
2.5	<b>Beispiel . . . . .</b>	<b>57</b>
2.5.1	Aufgabenstellung . . . . .	57
2.5.2	Beanspruchungsanalyse . . . . .	58
2.5.3	Kurzzeitfestigkeitfestigkeitsnachweis . . . . .	59
2.5.4	Lebensdauerberechnung . . . . .	60
2.5.5	Proof-Test-Belastung . . . . .	60
2.5.6	Zuverlässigkeit / Bruchwahrscheinlichkeit . . . . .	60
2.5.7	Diskussion . . . . .	60
2.6	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>61</b>
2.7	<b>Kurzzeichenverzeichnis zu Kapitel 2 . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>3</b>	<b>Konstruktion mit keramischen Werkstoffen . . . . .</b>	<b>63</b>
3.0	<b>Problemstellung . . . . .</b>	<b>63</b>
3.1	<b>Konstruktionsrelevante Eigenschaften keramischer Werkstoffe und sich ergebende Konstruktionsprobleme . . . . .</b>	<b>63</b>
3.2	<b>Grundlagen der keramikgerechten Konstruktion . . . . .</b>	<b>71</b>
3.2.1	Einflußgrößen und Vorgehensweise . . . . .	71
3.2.2	Grundregeln und Konstruktionsempfehlungen . . . . .	75
3.3	<b>Konstruktive Gestaltung keramischer Bauteile . . . . .</b>	<b>78</b>
3.3.1	Einfache Formen anstreben . . . . .	79
3.3.2	Spannungsspitzen vermeiden . . . . .	81
3.3.3	Zugspannungen minimieren . . . . .	84
3.3.4	Materialanhäufungen vermeiden . . . . .	86
3.3.5	Nachbearbeitung minimieren . . . . .	87
3.3.6	Fertigungsspezifische Besonderheiten berücksichtigen . .	91
3.4	<b>Grundregeln zur konstruktiven Gestaltung lösbarer Verbindungen mit keramischen Bauteilen . . . . .</b>	<b>102</b>
3.4.1	Bedeutung lösbarer Verbindungen . . . . .	102
3.4.2	Gestaltung lösbarer keramischer Verbindungen . . . . .	102
3.5	<b>Schraubenverbindungen mit keramischen Bauteilen . . . . .</b>	<b>113</b>
3.5.1	Bedeutung und Verbindungsvarianten . . . . .	113
3.5.2	Innengewinde in keramischen Bauteilen . . . . .	114
3.5.3	Gestaltung von Schraubenverbindungen . . . . .	116
3.5.4	Berechnung und Auslegung . . . . .	123
3.5.5	Sicherungsmaßnahmen . . . . .	128

<b>3.6</b>	<b>Welle-Nabe-Verbindungen mit keramischen Bauteilen . . . . .</b>	<b>131</b>
3.6.1	Bedeutung und Verbindungsvarianten . . . . .	131
3.6.2	Gestaltung . . . . .	133
3.6.3	Zur Berechnung . . . . .	138
<b>3.7</b>	<b>Anwendungsbeispiele . . . . .</b>	<b>139</b>
3.7.1	Technische Einsatzbereiche der Hochleistungskeramik . . . . .	139
3.7.2	Beispiel Zündkerze . . . . .	143
3.7.3	Beispiel Chemiepumpe . . . . .	144
3.7.4	Beispiel Wälzlager . . . . .	149
3.7.5	Beispiel Drosselventil . . . . .	151
3.7.6	Beispiel Strahldüse . . . . .	152
<b>3.8</b>	<b>Kurzzeichenverzeichnis zu Kapitel 3 . . . . .</b>	<b>153</b>

## **4 Bearbeitung keramischer Werkstoffe . . . . .** 156

<b>4.1</b>	<b>Fertigungsprozesse und Bearbeitung keramischer Bauteile . . . . .</b>	<b>156</b>
4.1.1	Grundlagen . . . . .	156
4.1.2	Fertigungsvarianten für unterschiedliche Werkstoffe . . . . .	164
4.1.3	Erfordernisse und Besonderheiten der spanenden Bearbeitung von technischer Keramik . . . . .	168
<b>4.2</b>	<b>Grün- und Weißbearbeitung . . . . .</b>	<b>170</b>
<b>4.3</b>	<b>Hartbearbeitung . . . . .</b>	<b>177</b>
4.3.1	Einstufiger Schleifprozeß . . . . .	178
4.3.2	Mehrstufiger Schleifprozeß . . . . .	190
4.3.2.1	Allgemeines . . . . .	190
4.3.2.2	Möglichkeiten und Grenzen der Rauheitsbeeinflussung beim mehrstufigen Schleifprozeß . . . . .	191
4.3.2.3	Gestaltungshinweise für Schleifprozesse . . . . .	193
<b>4.4</b>	<b>Kurzzeichenverzeichnis zu Kapitel 4 . . . . .</b>	<b>195</b>

## **5 Verbindungstechnik von Konstruktionskeramik** 197

<b>5.1</b>	<b>Allgemeine Übersicht über die Verbundverfahren bei Konstruktionskeramik . . . . .</b>	<b>197</b>
5.1.1	Kraft- und formschlüssige Verbindungen . . . . .	198
5.1.2	Stoffschlüssige Verbindungen — Verbunde über physikalisch-chemische Bindung . . . . .	205
<b>5.2</b>	<b>Charakterisierung stoffschlüssiger Verbundverfahren . . . . .</b>	<b>207</b>
5.2.1	Diffusionsschweißen . . . . .	207
5.2.2	Reaktionsverbunde . . . . .	209

5.2.2.1	Druckloses Fügen mit Zwischenschichten . . . . .	209
5.2.2.2	Heißpressen . . . . .	210
5.2.3	Lötverfahren . . . . .	212
5.2.3.1	Zweistufiges Löten . . . . .	212
5.2.3.2	Einstufiges Löten . . . . .	215
5.3	Kurzzeichenverzeichnis zu Kapitel 5 . . . . .	220
<b>6</b>	<b>Keramische Schichten . . . . .</b>	<b>221</b>
6.1	Plasmaspritzen, Herstellen und Einsatz . . . . .	221
6.1.1	Verfahren des Plasmaspritzens . . . . .	221
6.1.1.1	Atmosphärisches Plasmaspritzen . . . . .	221
6.1.1.2	Vakuumplasmaspritzen . . . . .	222
6.1.1.3	Hochgeschwindigkeitsplasmaspritzen . . . . .	224
6.1.1.4	Flüssigkeitsstabilisiertes Plasmaspritzen . . . . .	224
6.1.2	Plasmaspritzanlagen . . . . .	225
6.1.2.1	Stationäre Anlagen . . . . .	226
6.1.2.2	Fahrbare Anlagen . . . . .	229
6.1.3	Spritzwerkstoffe . . . . .	229
6.1.3.1	Schwerschmelzbare Metalle . . . . .	233
6.1.3.2	Metallegierungen . . . . .	234
6.1.3.3	Intermetallische und nichtmetallische Werkstoffe . . . . .	235
6.1.3.4	Oxide . . . . .	235
6.1.3.5	Nichttoxische Werkstoffe . . . . .	238
6.1.3.6	Metall-Keramik-Komplexe (Cermets) . . . . .	238
6.1.4	Plasma- und Trägergase . . . . .	239
6.1.5	Herstellung der Schichten . . . . .	244
6.1.5.1	Haftgrundvorbereitung . . . . .	245
6.1.5.2	Vorbereitung der Werkstücke zur Beschichtung . . . . .	246
6.1.5.3	Beschichtung . . . . .	247
6.1.5.4	Nachbehandlung von Spritzschichten . . . . .	256
6.1.6	Einsatz der Schichten . . . . .	257
6.1.7	Sicherheitsbestimmungen für die Errichtung und das Betreiben einer Plasmaspritzanlage . . . . .	263
6.2	Keramische dünne Schichten, Herstellung und Eigenschaften . . . . .	265
6.2.1	Verfahren der Hartstoffbeschichtung aus der Gasphase . . . . .	265
6.2.1.1	Chemische Gasabscheidung (CVD) . . . . .	266
6.2.1.2	Physikalische Gasabscheidung (PVD) . . . . .	269
6.2.2	Struktur und Eigenschaften von Hartstoffschichten . . . . .	276
6.2.2.1	Strukturzonenmodelle . . . . .	276

6.2.2.2	Schichtspannungen, Mikrohärte, Haftfestigkeit . . . . .	279
6.2.3	Einsatz von Hartstoffschichten zum Verschleißschutz . . . . .	287
6.2.3.1	Grundformen des Verschleißes . . . . .	287
6.2.3.2	Verschleißprüfung von Hartstoffsystemen . . . . .	288
6.3	Kurzzeichenverzeichnis zu Kapitel 6 . . . . .	291
<b>7</b>	<b>Prüfung der Konstruktionskeramik . . . . .</b>	<b>293</b>
7.1	Mechanische Prüfung . . . . .	293
7.1.1	Ermittlung der Festigkeit . . . . .	293
7.1.2	Härtemessung . . . . .	296
7.1.2.1	Definition . . . . .	296
7.1.2.2	Erzeugung von Indentereindrücken . . . . .	296
7.1.2.3	Verschiedene Methoden der Härtemessung . . . . .	297
7.1.3	Ermittlung der Bruchzähigkeit . . . . .	302
7.1.3.1	Definition . . . . .	302
7.1.3.2	Gekerbt Biegeproben . . . . .	303
7.1.3.3	Bruchmechanische Bewertung der Risse an Indentereindrücken . . . . .	304
7.1.3.4	Verschiedene Methoden zur Ermittlung der Bruchzähigkeit . . . . .	306
7.1.4	Indentermethoden . . . . .	309
7.2	Zerstörungsfreie Prüfung . . . . .	315
7.2.1	Problemstellung . . . . .	315
7.2.2	Penetrationsprüfung . . . . .	316
7.2.3	Röntgenprüfung . . . . .	317
7.2.4	Ultraschallprüfung . . . . .	319
7.2.5	Schallemissionsanalyse . . . . .	330
7.3	Kurzzeichenverzeichnis zu Kapitel 7 . . . . .	333
<b>8</b>	<b>Tribologisches Verhalten von Konstruktionskeramik . . . . .</b>	<b>335</b>
8.1	Einführung . . . . .	335
8.2	Einflußgrößen auf das Reibungs- und Verschleißverhalten keramischer Werkstoffe . . . . .	336
8.2.1	Abrasiver Verschleiß . . . . .	336
8.2.2	Werkstoffkenngrößen . . . . .	336
8.2.3	Thermischer Verschleiß . . . . .	337
8.2.4	Verschleißpartikeladhäsion . . . . .	337

8.2.5	Einfluß der Luftfeuchte, der Schmierung und der Temperatur . . . . .	338
8.3	Untersuchungsergebnisse zum tribologischen Verhalten von Konstruktionskeramik . . . . .	339
8.4	Kurzzeichenverzeichnis zu Kapitel 8 . . . . .	342
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	343
<b>10</b>	<b>Autorenkollektiv</b> . . . . .	364
<b>11</b>	<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	365