

# Neue

---

# keramische

---

# Werkstoffe

---

Herausgegeben von  
Prof. Dr. rer. nat. habil. Lothar Michalowsky

Mit 276 Abbildungen und 118 Tabellen



Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie  
Leipzig · Stuttgart

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorbemerkungen</b>	11
	Literaturverzeichnis	21
<b>2</b>	<b>Hochtechnologien zur Herstellung neuer keramischer Werkstoffe</b>	22
2.1	Präparation keramischer Ausgangspulver	22
2.1.1	Struktur und Eigenschaften keramischer Pulver	22
2.1.2	Grundvorgänge bei der Synthese keramischer Pulver	25
2.1.2.1	Keimbildung und Kristallisation	25
2.1.2.2	Mechanische Zerteilung kondensierter Phasen	27
2.1.2.3	Wirkung der Kapillarkräfte im Trockenprozeß	28
2.1.2.4	Pseudomorphose bei Calcinationsprozessen	29
2.1.3	Chemische Pulverherstellungsverfahren in flüssiger Phase	33
2.1.3.1	Fäll- und Kristallisationsprozesse in wäßriger Phase	34
2.1.3.2	Gefriertrocknung	38
2.1.3.3	Sol-Gel-Prozeß	45
2.1.3.4	Hydrothermale Pulversynthesen	49
2.1.3.5	Thermische Umwandlung versprühter Lösungen	52
2.1.3.6	Emulsionsverfahren	54
2.1.3.7	Zersetzung von Schmelzen	57
2.1.3.8	Pulverherstellung in Salzschnmelzen	58
2.1.4	Pulverherstellung in der Gasphase	59
2.1.4.1	Reaktionen in Flammen und Wärmezufuhr über heiße Wände	60
2.1.4.2	Plasmasythese	62
2.1.4.3	Lasersynthese	63
2.1.5	Pulverherstellung durch Festkörperreaktionen	65
2.1.5.1	Selbstaubreitende Synthese	65
2.1.5.2	Nitride und Carbide aus Metallen oder Oxiden	67
2.1.6	Mechanische Zerkleinerung	70
2.2	Formgebung und Sintern	74
2.2.1	Technologische Grundverfahren	75
2.2.1.1	Standardformgebungsverfahren und Sinterverfahren der Keramik	75
2.2.1.2	Plastische Formgebungsverfahren der Keramik	77
2.2.1.3	Hochverdichtungsverfahren bei gleichzeitiger Anwendung hoher Drücke und Temperaturen	79
2.2.1.4	Sol-Gel-Technik	80

2.2.1.5	Nichtkonventionelle Formgebungs- und Verdichtungsverfahren . . . . .	82
2.2.2	Technologische Maßnahmen zur Herstellung defektarmer Formkörper . . . . .	85
2.2.2.1	Maßnahmen beim Pressen granulierter Pulver . . . . .	85
2.2.2.2	Granulatfreie Formgebung . . . . .	88
2.3	Sintern . . . . .	90
2.3.1	Technologische Grundverfahren . . . . .	93
2.3.2	Grundbegriffe mikroskopischer Sintervorgänge . . . . .	94
2.3.2.1	Einige thermodynamische Grundlagen zum Anfangsstadium des Sinterns . . . . .	95
2.3.2.2	Verdichtung im Zwischenstadium des Sinterns . . . . .	97
2.3.2.3	Verdichtung und Kornwachstum im Endstadium . . . . .	99
	Literaturverzeichnis . . . . .	103
<b>3</b>	<b>Elektrische Funktionskeramik . . . . .</b>	<b>108</b>
3.1	Ionenleitende Keramikwerkstoffe . . . . .	108
3.1.1	Theoretische Beschreibung der Ionenleitfähigkeit . . . . .	110
3.1.2	Ursachen der Ionenleitfähigkeit . . . . .	110
3.1.3	Superionenleiter . . . . .	112
3.1.4	Bedeutung der Ionenleiter . . . . .	114
3.2	Di- und Ferroelektrika . . . . .	115
3.2.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	119
3.2.1.1	Lineare und nichtlineare Dielektrika . . . . .	121
3.2.1.2	Materialgleichungen . . . . .	122
3.2.2	Grundeigenschaften dielektrischer und ferroelektrischer Keramik . . . . .	127
3.2.2.1	Temperaturabhängigkeit und Alterungserscheinungen . . . . .	128
3.2.2.2	Abhängigkeit von äußeren elektrischen Feldern und mechanischen Spannungen . . . . .	131
3.2.2.3	Frequenzabhängigkeit . . . . .	138
3.2.3	Dielektrische keramische Werkstoffsysteme . . . . .	143
3.2.3.1	Dielektrika für Kondensatoren des Typs I . . . . .	145
3.2.3.2	Dielektrika für Kondensatoren des Typs II . . . . .	147
3.2.3.3	Mischdielektrika . . . . .	150
3.2.3.4	Piezoelektrische Werkstoffe . . . . .	150
3.2.3.5	Elektrostriktive Werkstoffe . . . . .	155
3.2.3.6	Elektrooptische Werkstoffe . . . . .	156
3.2.3.7	Pyroelektrische Werkstoffe . . . . .	157
3.2.3.8	Werkstoffe für Elektrete und Varikonden . . . . .	158
3.2.4	Halbleitende Keramik . . . . .	158
3.2.4.1	Heißeiter . . . . .	159
3.2.4.2	Kaltleiter . . . . .	164
3.2.4.3	Varistoren . . . . .	169
3.3	Ferroelektrische Verbundwerkstoffe . . . . .	171
3.3.1	Physikalische Grundeigenschaften . . . . .	172
3.3.1.1	Verknüpfungsmöglichkeit (connectivity) und weitere Kennzeichnungen . . . . .	172
3.3.1.2	Summen-, Kombinations- und Produkteigenschaften . . . . .	173

3.3.1.3	Transporteigenschaften . . . . .	174
3.3.2	Symmetrieeigenschaften . . . . .	175
3.3.3	Ausgewählte Anwendungsbeispiele . . . . .	176
3.4	Keramische Hochtemperatur-Supraleiter . . . . .	177
3.4.1	Problemstellung . . . . .	177
3.4.2	Physik des Kristallaufbaus . . . . .	179
3.4.3	Elektronische Eigenschaften . . . . .	179
3.4.4	Stromdichte und kritische Magnetfeldstärken . . . . .	180
3.4.5	Die Bardeen-Cooper-Schrieffer-(BSC-) Theorie . . . . .	181
3.4.6	Elektronen-Phononen-Wechselwirkung als Ursache der Supraleitung . . . . .	182
3.4.7	Elektron-Elektron-Wechselwirkung . . . . .	183
3.4.8	Ausblick . . . . .	185
3.5	Ferrimagnetische Oxide . . . . .	185
3.5.1	Grundlagen des Ferrimagnetismus . . . . .	185
3.5.1.1	Das permanente magnetische Moment der Atome bzw. Ionen . . . . .	186
3.5.1.2	Ferrimagnetische Kristallstrukturen . . . . .	190
3.5.2	Spontane Magnetisierung . . . . .	194
3.5.3	Freie Energie magnetischer Werkstoffe . . . . .	197
3.5.3.1	Magnetische Kristallanisotropieenergie . . . . .	198
3.5.3.2	Induzierte Anisotropieenergie . . . . .	205
3.5.3.3	Magnetostriktion, Spannungsenergie . . . . .	206
3.5.3.4	Formanisotropieenergie, Austauschanisotropieenergie . . . . .	209
3.5.4	Leitungsvorgänge in Ferriten . . . . .	209
3.5.5	Hystereseerscheinungen in Ferriten . . . . .	211
3.5.6	Bloch-Wände, Bloch-Wandenergie, Bereichsstruktur . . . . .	214
3.5.7	Verhalten ferrimagnetischer Werkstoffe im elektrischen Wechselfeld . . . . .	216
3.5.8	Modellansätze zur näherungsweise Berechnung der Anfangspermeabilität . . . . .	220
3.5.9	Ferritwerkstoffe für technische Anwendungen . . . . .	222
3.5.9.1	Mangan-Zink-Ferrite . . . . .	222
3.5.9.2	Nickel-Zink-Ferrite . . . . .	247
3.5.9.3	Hexaferrite/Dauermagnetwerkstoffe . . . . .	252
	Literaturverzeichnis . . . . .	261

## **4      Keramische Werkstoffe für konstruktive Anwendungen . . . . . 269**

4.1	Elektronenmikroskopie keramischer Werkstoffe . . . . .	269
4.1.1	Einleitung . . . . .	269
4.1.2	Strukturhierarchie und mechanische Eigenschaften . . . . .	270
4.1.3	Elektronenmikroskopische Durchstrahlungsabbildung . . . . .	273
4.1.3.1	Höchstspannungs-Elektronenmikroskopie . . . . .	273
4.1.3.2	Hochauflösungs-Elektronenmikroskopie . . . . .	274
4.1.4	Experimentelle Untersuchungen . . . . .	277
4.1.4.1	Verwendete Materialien . . . . .	277
4.1.4.2	Präparation und verwendete Geräte . . . . .	277
4.1.5	Ausgewählte Ergebnisse . . . . .	278
4.1.5.1	Mikrostruktur von $ZrO_2$ -haltiger $Al_2O_3$ -Keramik . . . . .	278

4.1.5.2	Mikrostruktur von TiC-haltiger Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Keramik . . . . .	291
4.1.5.3	Mikrostruktur von langfaserverstärkten Keramiken und Gläsern	297
4.2	Konstruktionskeramik . . . . .	306
4.2.1	Prinzipien mikrostrukturellen Konstruierens zur Entwicklung makroskopischer Gebrauchseigenschaften . . . . .	306
4.2.1.1	Bruchmechanische Grundlagen und einige Konsequenzen für die Werkstoff- und Bauteilprüfung . . . . .	308
4.2.1.2	Korngrenzeneinflüsse . . . . .	316
4.2.1.3	Oberflächeneinflüsse . . . . .	341
4.2.1.4	Faser- und Whiskerverstärkung; Alternativen . . . . .	345
4.2.2	Wichtige oxidkeramische Konstruktionswerkstoffe . . . . .	349
4.2.2.1	Aluminiumoxid . . . . .	350
4.2.2.2	Zirconiumdioxid . . . . .	353
4.2.2.3	Dispersionswerkstoffe . . . . .	355
4.2.2.4	Substratwerkstoffe für die Mikroelektronik . . . . .	362
4.2.2.5	Aluminiumtitanat (Tialit) . . . . .	370
4.2.3	Carbidwerkstoffe . . . . .	374
4.2.3.1	Siliciumcarbidwerkstoffe . . . . .	374
4.2.3.2	Tetraborcarbid (B <sub>4</sub> C) . . . . .	388
4.2.3.3	Titaniumcarbid (TiC) . . . . .	392
4.2.4	Nitridwerkstoffe . . . . .	395
4.2.4.1	Siliciumnitridwerkstoffe . . . . .	395
4.2.4.2	Bornitrid . . . . .	432
4.2.4.3	Titaniumnitrid (TiN) . . . . .	435
4.2.4.4	Aluminiumnitrid . . . . .	438
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>446</b>
	<b>Sachwörterverzeichnis . . . . .</b>	<b>456</b>