

Von Prof. Dr. rer. nat.  
Armin Petzold

3., überarbeitete Auflage

Mit 267 Bildern und 67 Tabellen

# **Anorganisch- nichtmetallische Werkstoffe**

*Charakteristik · Eigenschaften  
Anwendungsverhalten*



DEUTSCHER VERLAG FÜR  
GRUNDSTOFFINDUSTRIE  
LEIPZIG · STUTTGART

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einführung</b>	11	<b>2.7.</b>	Thermisches Verhalten	46
1.1.	Begriff Werkstoff	11	2.7.1.	Spezifische Wärmekapazität	46
1.2.	Abgrenzung und Einteilung der Werkstoffe	11	2.7.2.	Wärmeausdehnung	46
1.3.	Bedeutung der anorganisch-nichtmetallischen Werkstoffe	13	2.7.3.	Wärmetransport in anorganisch-nichtmetallischen Materialien	47
<b>2.</b>	<b>Grundcharakteristika anorganisch-nichtmetallischer Werkstoffe.</b>	14	<b>2.8.</b>	Materietransport in anorganisch-nichtmetallischen Werkstoffen	50
2.1.	Atomistische Grundlagen anorganisch-nichtmetallischer Stoffe	14	2.8.1.	Thermisch aktivierte Diffusion	50
2.2.	Kristalliner und glasiger Zustand	16	2.8.2.	Infiltration und Tränkung	52
2.2.1.	Ionenkristalle	16	2.8.3.	Gasdurchlässigkeit	53
2.2.2.	Verknüpfungsprinzipien von [SiO <sub>4</sub> ]-Tetraedern	17	2.9.	Elektrische Eigenschaften	54
2.2.3.	Strukturen natürlicher Gitter	17	2.9.1.	Dielektrisches Verhalten (Dielektrizität; dielektrischer Verlust)	54
2.2.4.	Realkristalle und Gitterstörungen	19	2.9.2.	Stromtransport in anorganisch-nichtmetallischen Materialien	55
2.2.5.	Glaszustand	22	2.10.	Entstehung und Auswirkung von Spannungen in spröden Werkstoffen	56
2.3.	Polykristallines und mehrphasiges System	24	2.10.1.	Thermische Spannungen in homogenen Körpern	56
2.3.1.	Polykristallinität	24	2.10.2.	Spannungen in heterogenen Materialien	57
2.3.2.	Allgemeine mehrphasige Systeme	26	2.10.3.	Temperaturwechselverhalten	59
2.3.3.	Kompositsysteme	27	2.11.	Prinzipien anorganisch-nichtmetallischer Kompositwerkstoffe	61
2.4.	Porige Körper	27	2.11.1.	Begriffe, Abgrenzung, Einteilung	61
2.5.	Spröde Körper	28	2.11.2.	Grundlegende Merkmale kompakter Kompositwerkstoffe	62
2.5.1.	Allgemeine Charakteristika der Sprödigkeit	28	<b>3.</b>	<b>Natürliche mineralische Werkstoffe</b>	66
2.5.2.	Spröbruch	30	3.1.	Begriff und Einteilung	66
2.5.3.	Teilplastizität und Duktilität bei anorganisch-nichtmetallischen Materialien	31	3.2.	Allgemeine Charakteristika der hauptsächlich natürlichen mineralischen (vorzugsweise grobdispersen) Werkstoffe	67
2.6.	Mechanische Eigenschaften anorganisch-nichtmetallischer Werkstoffe	33	3.2.1.	Chemische Charakteristika	67
2.6.1.	Elastisches Verhalten	33	3.2.2.	Petrographische und gesteinsbildende Gefügemerkmale	68
2.6.2.	Mechanische Festigkeit	35	3.2.3.	Physikalisch-mechanische Charakteristik	70
2.6.3.	Thermomechanisches Verhalten	42			

3.2.4.	Thermische Eigenschaften . . . . .	73	4.3.6.	Chemische Beständigkeit . . . . .	103
3.2.5.	Hygrometrische Eigenschaften und Verwitterungsverhalten . . . . .	73	4.3.7.	Elektrische Eigenschaften . . . . .	107
3.3.	Technische Werkstoffe . . . . .	74	4.3.7.1.	Elektrische Leitfähigkeit . . . . .	107
3.3.1.	Kohlenstoffwerkstoffe . . . . .	75	4.3.7.2.	Dielektrizitätskonstante und dielektrischer Verlust . . . . .	108
3.3.2.	SiO <sub>2</sub> -Werkstoffe . . . . .	75	4.3.7.3.	Elektrische Durchschlagfestigkeit . . . . .	109
3.3.3.	Monomineralische grobdisperse silicatische Werkstoffe . . . . .	75	4.4.	Glasfehler . . . . .	109
3.3.4.	Monomineralische feindisperse silicatische Werkstoffe . . . . .	78	4.5.	Charakteristika wichtiger Glastypen	110
3.3.5.	Polymineralische grobdisperse silicatische Werkstoffe . . . . .	78	4.5.1.	Kieselglas . . . . .	110
3.3.6.	Carbonatwerkstoffe . . . . .	79	4.5.2.	Alkali-Erdalkali-Silicatglas . . . . .	110
3.4.	Anwendungsaspekte natürlicher mineralischer Werkstoffe . . . . .	80	4.5.3.	Borosilicatglas . . . . .	111
4.	<b>Glaswerkstoffe</b> . . . . .	82	4.5.4.	Bleisilicatglas . . . . .	111
4.1.	Allgemeine Grundlagen . . . . .	82	4.5.5.	Nichtsilicatische Gläser . . . . .	111
4.1.1.	Begriff und Einteilung der Gläser . . . . .	82	4.6.	Glaswerkstoffe für ausgewählte Anwendungszwecke . . . . .	112
4.1.2.	Abriß der Glasherstellung . . . . .	83	4.6.1.	Wirtschaftsglas . . . . .	112
4.2.	Physikalisch-chemische Grundlagen der technischen Glasbildung . . . . .	83	4.6.2.	Technische Gerätegläser . . . . .	113
4.2.1.	Glasbildung und Glasigkeit erstarrter Silicatschmelzen . . . . .	83	4.6.3.	Bauglas . . . . .	115
4.2.2.	Entglasung (Kristallisation) . . . . .	84	4.6.4.	Gläser für optische, licht- und strahlungstechnische Zwecke . . . . .	115
4.2.3.	Entmischung . . . . .	85	4.6.5.	Elektrotechnisches Glas . . . . .	118
4.3.	Allgemeine Eigenschaften der Gläser	86	4.6.6.	Schaumglas . . . . .	119
4.3.1.	Zur Eigenschaftsberechnung aus der Zusammensetzung . . . . .	86	4.6.7.	Glasbasis-Kompositwerkstoffe . . . . .	119
4.3.2.	Physikalisch-mechanische Eigenschaften . . . . .	87	5.	<b>Synthetische einkristalline Werkstoffe</b> . . . . .	121
4.3.2.1.	Dichte . . . . .	87	5.1.	Züchtung von Einkristallen . . . . .	121
4.3.2.2.	Elastisches Verhalten . . . . .	88	5.2.	Besonderheiten von Einkristall-Werkstoffen . . . . .	121
4.3.2.3.	Festigkeit . . . . .	89	5.3.	Ausgewählte einkristalline Werkstoffe	122
4.3.3.	Thermische Eigenschaften . . . . .	93	5.3.1.	Element-Einkristalle — Diamant . . . . .	122
4.3.3.1.	Spezifische Wärmekapazität . . . . .	94	5.3.2.	Einkristalline Oxide und Oxidverbindungen . . . . .	124
4.3.3.2.	Wärmeleitfähigkeit . . . . .	94	5.3.3.	Einkristalle sauerstofffreier Chalkogenide . . . . .	125
4.3.3.3.	Wärmedehnung . . . . .	94	5.3.4.	Einkristalline Verbindungen mit Anionen der 5. Hauptgruppe . . . . .	125
4.3.4.	Thermomechanische Eigenschaften	95	5.3.5.	Einkristalline Halogenide . . . . .	125
4.3.4.1.	Viskosität . . . . .	96	6.	<b>Keramische Werkstoffe</b> . . . . .	126
4.3.4.2.	Oberflächenspannung . . . . .	97	6.1.	Allgemeine Grundlagen keramischer Werkstoffe . . . . .	126
4.3.4.3.	Temperaturwechselbeständigkeit . . . . .	98	6.1.1.	Begriff und Einordnung . . . . .	126
4.3.5.	Optische Eigenschaften . . . . .	98	6.1.2.	Prinzip der Keramik und Abriß der Technologie . . . . .	127
4.3.5.1.	Lichtbrechung und Dispersion . . . . .	98	6.2.	Silicatkeramische Werkstoffe (Allgemeine Charakteristik) . . . . .	129
4.3.5.2.	Spannungsdoppelbrechung . . . . .	99	6.2.1.	Gefüge keramischer Werkstoffe . . . . .	129
4.3.5.3.	Lichtdurchlässigkeit (Transmission) und spektrale Absorption . . . . .	100			
4.3.5.4.	Remission . . . . .	102			

6.2.2.	Mechanische Festigkeitseigenschaften . . . . .	131	6.6.2.4.	Magnesiumsilicatische feinkeramische Werkstoffe . . . . .	170
6.2.3.	Thermische Belastbarkeit . . . . .	132	6.6.2.5.	Hochtonerdehaltige feinkeramische Werkstoffe . . . . .	172
6.2.4.	Wärmetransport . . . . .	132	6.6.2.6.	Komplexe Funktions-Silicatkeramiken . . . . .	172
6.2.5.	Wärmeausdehnung . . . . .	133	6.7.	Glaskeramische Werkstoffe (Sitall-Keramik) . . . . .	173
6.2.6.	Temperaturwechselbeständigkeit . . . . .	134	6.7.1.	Prinzip der Glaskeramik . . . . .	173
6.2.7.	Elektrische Leitfähigkeit . . . . .	134	6.7.2.	Eigenschaften glaskeramischer Werkstoffe . . . . .	174
6.2.8.	Chemische Beständigkeit . . . . .	135	6.7.3.	Typen von Glaskeramiken . . . . .	176
6.3.	Physikalisch-chemische Charakteristika von Glasuren . . . . .	136	6.7.4.	Sitallisierte petrurgische (Gesteins- und Schlacken-) Keramiken . . . . .	178
6.4.	Nichtfeuerfeste Silicat-Grobkeramik	136	6.8.	Oxid- und Polyoxidkeramik . . . . .	179
6.4.1.	Poröse grobkeramische Silicatwerkstoffe . . . . .	137	6.8.1.	Grobkeramische feuerfeste Oxidwerkstoffe . . . . .	179
6.4.2.	Dichte grobkeramische Silicatwerkstoffe . . . . .	138	6.8.1.1.	Körnige, ungeformte Korundwerkstoffe . . . . .	179
6.5.	Grobkeramische, vorwiegend silicatische Feuerfestwerkstoffe . . . . .	139	6.8.1.2.	Korundbasis-Kompositwerkstoffe — Schleifkörper . . . . .	180
6.5.1.	Allgemeine Feuerfest-Prinzipien, Begriffe und Abgrenzung . . . . .	139	6.8.1.3.	Schmelzgegossene $Al_2O_3$ -Werkstoffe	181
6.5.2.	Spezifische Eigenschaften feuerfester Materialien . . . . .	140	6.8.1.4.	SG-Korundbasis-Kompositwerkstoffe . . . . .	183
6.5.2.1.	Physikalisch-mechanische Kennwerte	140	6.8.2.	Feinkeramische Werkstoffe auf Basis hochschmelzender Oxide und binärer Oxidsysteme . . . . .	184
6.5.2.2.	Thermomechanisches Verhalten . . . . .	141	6.8.2.1.	Allgemeine Charakteristik der Hochtemperatur-Oxidkeramik . . . . .	184
6.5.2.3.	Thermische Eigenschaften . . . . .	144	6.8.2.2.	Sinterzirconiumdioxid . . . . .	188
6.5.2.4.	Elektrische Eigenschaften . . . . .	145	6.8.2.3.	Aluminiumoxidkeramik . . . . .	190
6.5.2.5.	Verschleiß- und Korrosionsverhalten	145	6.8.2.4.	Erdalkali-Sinteroxide . . . . .	192
6.5.3.	Silica . . . . .	149	6.8.2.5.	Schwermetalloxid-Keramik . . . . .	193
6.5.4.	Aluminiumsilicatische und Hochkorund-Werkstoffe . . . . .	152	6.8.2.6.	Keramik aus binären und polynären Oxiden . . . . .	193
6.5.4.1.	Normalschamotte . . . . .	152	6.8.3.	Rutil- und Titanat-Funktionskeramiken (Di- und Ferroelektrika) . . . . .	194
6.5.4.2.	Hochtonerdehaltige Schamotte-Werkstoffe . . . . .	156	6.8.3.1.	Elektrische Grundlagen . . . . .	194
6.5.4.3.	Schamottebasis-Kompositwerkstoffe	158	6.8.3.2.	Stoffliche Grundlagen . . . . .	195
6.5.5.	Basische (silicathaltige) Feuerfestwerkstoffe . . . . .	159	6.8.3.3.	Einteilung . . . . .	196
6.5.5.1.	Grundlagen . . . . .	159	6.8.3.4.	Rutil-Keramik . . . . .	197
6.5.5.2.	Periklas-Werkstoffe . . . . .	160	6.8.3.5.	Titanat-Keramik . . . . .	197
6.5.5.3.	Magnesiabasis-Kompositwerkstoffe . . . . .	162	6.8.4.	Ferroelektrische PZT-Komplexkeramiken . . . . .	199
6.5.5.4.	Forsterit-Feuerfestwerkstoffe . . . . .	162	6.8.5.	Oxid- und komplexkeramische Werkstoffe auf Basis $Fe_2O_3$ und anderer Schwermetalloxide (Halbleiter- und Magnetkeramik) . . . . .	200
6.5.5.5.	Sinterdolomit-Werkstoffe . . . . .	162	6.8.5.1.	Elektrische und magnetische Grundlagen . . . . .	200
6.5.6.	Feuerfeste silicatkeramische Leichtbaustoffe . . . . .	163	6.8.5.2.	Stoffliche Grundlagen . . . . .	201
6.6.	Feinkeramische Silicatwerkstoffe . . . . .	164			
6.6.1.	Poröse feinkeramische Werkstoffe — Steingut . . . . .	164			
6.6.2.	Dichte feinkeramische Silicatwerkstoffe . . . . .	165			
6.6.2.1.	Grundlagen . . . . .	165			
6.6.2.2.	Porzellan . . . . .	166			
6.6.2.3.	Porzellanartige Kompositwerkstoffe — Keramovitrone . . . . .	170			

6.8.5.3.	Oxid- und komplexkeramische Halbleiterwerkstoffe . . . . .	203	<b>8.</b>	<b>Betone und hydrothermal verfestigte C-S-H-Werkstoffe</b> . . . . .	235
6.8.5.4.	Oxid- und komplexkeramische Magnetwerkstoffe . . . . .	204	8.1.	Begriffe und Abgrenzung . . . . .	235
6.8.6.	Komplexkeramiken im System $Me_mO_n$ -Erdalkalioxid-Kupferoxid (Supraleiter) . . . . .	206	8.2.	Betone . . . . .	236
6.9.	Nichtoxid-Keramik . . . . .	207	8.2.1.	Allgemeine Charakteristika und Eigenschaften der Betone . . . . .	236
6.9.1.	Begriffe und Einteilung . . . . .	207	8.2.2.	Zementgebundene Massenbetone . . . . .	241
6.9.2.	Allgemeine Charakteristika nichtoxidischer Werkstoffe . . . . .	208	8.2.2.1.	Stoffliche Grundlagen . . . . .	241
6.9.3.	Keramische Werkstoffe aus elementaren Stoffen . . . . .	209	8.2.2.2.	Einteilung der zementgebundenen Betone . . . . .	242
6.9.3.1.	Kohlenstoffwerkstoffe . . . . .	209	8.2.2.3.	Spezielle Eigenschaften zementgebundener Betone . . . . .	242
6.9.3.2.	Borwerkstoffe . . . . .	212	8.2.3.	Chemisch und hydraulisch gebundene Spezialbetone . . . . .	244
6.9.4.	Metallähnliche Hartstoffe . . . . .	212	8.2.3.1.	Feuerbeton . . . . .	244
6.9.5.	Keramische nichtmetallische Hartstoffe . . . . .	213	8.2.3.2.	Asbestbeton . . . . .	248
6.9.5.1.	Siliciumcarbid-Werkstoffe . . . . .	213	8.2.3.3.	Bewehrte Betone . . . . .	249
6.9.5.2.	Borcarbid-Werkstoffe . . . . .	217	8.3.	Hydrothermal erzeugte Werkstoffe	249
6.9.5.3.	Bornitrid-Werkstoffe . . . . .	217	8.3.1.	Kalksandsteine . . . . .	249
6.9.5.4.	Siliciumnitrid-Sinterwerkstoffe . . . . .	218	8.3.2.	Silicatbeton . . . . .	250
6.9.6.	Sonstige Nitrid- und Oxynitrid-Werkstoffe . . . . .	220	8.3.3.	Hitzebeständige Calciumsilicat-Wärmedämmstoffe . . . . .	251
6.9.6.1.	Aluminiumnitrid-Werkstoffe . . . . .	220	8.3.4.	Hitzebeständige Calciumaluminat-Wärmedämmstoffe . . . . .	252
6.9.6.2.	Siliciumoxynitrid-Werkstoffe . . . . .	220	8.4.	Werkstoffe auf Basis Gips . . . . .	252
6.9.6.3.	SiAlON-Werkstoffe . . . . .	221	8.4.1.	Füllstofffreie Gipswerkstoffe . . . . .	252
6.9.7.	Halogenidische und chalcogenidische Sinterwerkstoffe . . . . .	222	8.4.2.	Gipsbeton . . . . .	253
<b>7.</b>	<b>Anorganisch-nichtmetallische Faserwerkstoffe</b> . . . . .	223	8.4.3.	Verstärkte Gipswerkstoffe . . . . .	253
7.1.	Begriffe und Einteilung . . . . .	223	8.5.	Plastgebundene Betone . . . . .	254
7.2.	Besonderheiten faserförmiger Stoffe	223	<b>9.</b>	<b>Metallisch-nichtmetallische Kompositwerkstoffe</b> . . . . .	255
7.3.	Faserwerkstofftypen und Eigenschaften . . . . .	225	9.1.	Metall-Keramik-Volumen-Kompositwerkstoffe . . . . .	255
7.3.1.	Natürliche mineralische Fasern – Asbest . . . . .	225	9.1.1.	Hartmetalle . . . . .	255
7.3.2.	Elementfasern . . . . .	226	9.1.2.	Cermets . . . . .	256
7.3.3.	Hartstoff-Faserwerkstoffe . . . . .	227	9.1.3.	Keramisch verstärkte Metalle . . . . .	256
7.3.4.	Oxidische Faserwerkstoffe . . . . .	228	9.2.	Metall-Glas/Keramik-Schicht-Kompositwerkstoffe . . . . .	257
7.3.5.	Glasige Silicatfaser-Werkstoffe . . . . .	229	9.2.1.	Metall-Email-Systeme . . . . .	257
7.3.6.	Synthetische aluminiumsilicatische Faserwerkstoffe . . . . .	232	9.2.2.	Metall-Keramik-Schicht-Kompositwerkstoffe . . . . .	260
7.3.7.	Mineralfasern . . . . .	233	<b>Literaturverzeichnis und Quellenangaben</b>	261	
7.3.8.	Halogenid- und Chalcogenid-Faserwerkstoffe . . . . .	234	<b>Sachwörterverzeichnis</b> . . . . .	268	