

H.Salmang · H.Scholze

Keramik

7., vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage

Herausgegeben von Rainer Telle

Mit 551 Abbildungen und 132 Tabellen

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Definitionen	2
1.2	Historisches.....	3
1.3	Roh- und Werkstoffe	5
2	Strukturen	9
2.1	Bindungsarten	9
2.1.1	Kovalente Bindung (Atombindung).....	10
2.1.2	Ionenbindung.....	11
2.1.3	Metallische Bindung.....	12
2.1.4	Mischbindungen	12
2.1.5	Van der Waals-Bindung.....	14
2.1.6	Wasserstoffbrückenbindung	14
2.1.7	Ionenradien - Koordinationszahlen	15
2.2	Kristalle	20
2.2.1	Grundlagen der Kristallographie.....	20
2.2.2	Gittertypen und Kristallstrukturen	23
2.2.3	Gitterenergie.....	33
2.2.4	Gitterfehler.....	35
2.3	Kristallchemie der Silicate	40
2.3.1	Bindungsverhältnisse am Silicium.....	41
2.3.2	Systematik der Silicate.....	43
2.3.2.1	Insel- und Ringsilicate.....	51
2.3.2.2	Ketten- und Bandsilicate	56
2.3.2.3	Schichtsilicate.....	59
2.3.2.4	Gerüstsilicate	78
2.3.2.4.1	SiO ₂ -Modifikationen	78
2.3.2.4.2	Feldspäte	85
2.3.2.4.3	Feldspatvertreter	88
2.3.2.4.4	Zeolithe	90
2.4	Nichtkristalline Festkörper	93
2.4.1	Nahordnung und Fernordnung.....	93
2.4.2	Gläser.....	95
2.4.2.1	Struktur der Gläser.....	96
2.4.2.2	Eigenschaften der Gläser.....	101
2.5	Oberflächen - Grenzflächen	108
2.5.1	Bindungsverhältnisse und Eigenschaften	108
2.5.2	Oberflächenspannung - Oberflächenenergie.....	110
2.5.3	Grenzflächenenergie	113
2.5.4	Gekrümmte Oberflächen.....	119
2.5.5	Oberflächencharakterisierung.....	121

2.5.6	Teilchencharakterisierung.....	127
2.5.6.1	Begriffsbestimmungen und Prinzipien.....	127
2.5.6.2	Methoden der Korngrößenanalyse und -separation: Klassieren und Sichten	131
2.5.6.2.1	Trennen durch Siebung.....	132
2.5.6.2.2	Trennen durch Sichtung.....	134
2.5.6.2.3	Sedimentationsverfahren.....	138
2.5.6.2.4	Zählverfahren.....	140
2.6	Gefüge.....	144
2.6.1	Begriffe und Grundlagen.....	144
2.6.2	Untersuchungsmethoden	145
2.6.2.1	Lichtmikroskopie	145
2.6.2.1.1	Durchlicht-Polarisationsmikroskopie.....	146
2.6.2.1.2	Auflichtmikroskopie.....	150
2.6.2.2	Elektronenmikroskopie.....	153
2.6.2.2.1	Rasterelektronenmikroskopie.....	153
2.6.2.2.2	Transmissionselektronenmikroskopie.....	155
2.6.2.2.3	Elektronenmikroskopische Analytik.....	162
2.6.3	Quantitative Bildanalyse (Stereometrie).....	166
2.6.4	Porosität	169
3	Thermochemie	175
3.1	Thermodynamik.....	175
3.1.1	Grundlagen.....	175
3.1.2	Anwendungsbeispiele.....	180
3.2	Heterogene Gleichgewichte.....	185
3.2.1	Phasenregel.....	186
3.2.2	Phasendiagramme	190
3.2.3	Ungleichgewichte	221
3.2.4	Thermodynamische Berechnungen	221
3.3	Keramische Mehrstoffsysteme.....	225
3.3.1	Einstoffsysteme.....	226
3.3.1.1	SiO ₂	226
3.3.1.2	Al ₂ O ₃	236
3.3.1.3	H ₂ O	239
3.3.2	Zweistoffsysteme	243
3.3.2.1	SiO ₂ -Al ₂ O ₃	243
3.3.2.2	SiO ₂ -R ₂ O	248
3.3.2.3	SiO ₂ -RO	248
3.3.2.4	SiO ₂ -ZrO ₂	251
3.3.2.5	H ₂ O-haltige binäre Systeme	257
3.3.3	Dreistoffsysteme	261
3.3.3.1	K ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	262
3.3.3.2	Na ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	263
3.3.3.3	Li ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	264
3.3.3.4	MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	266
3.3.3.5	H ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ , H ₂ O-MgO-SiO ₂	267
3.3.4	Höherkomponentige Systeme	278
3.3.4.1	Feldspäte.....	278
3.3.4.2	Siliciumnitrid-Systeme	281

3.4	Kinetik	286
3.4.1	Triebkräfte	286
3.4.2	Diffusion	288
3.4.3	Reaktionen	298
3.4.4	Schmelzen und Kristallisieren	303
3.4.5	Kristallwachstum	307
4	Sintern	313
4.1	Triebkräfte und Phänomene	313
4.2	Festphasensintern	317
4.2.1	Anfangsstadium des Festphasensinterns	317
4.2.1	Zwischenstadium des Festphasensinterns	329
4.2.2	Endstadium des Festphasensinterns	334
4.3	Sintern mit Additiven	348
4.4	Sintern mit flüssiger Phase	351
4.4.1	Konstitutionelle Voraussetzungen	351
4.4.2	Halswachstum durch viskoses Fließen	352
4.4.3	Anfangsstadium des Flüssigphasensinterns	354
4.4.4	Mittelstadium des Flüssigphasensinterns	360
4.4.5	Endstadium des Flüssigphasensinterns	366
4.5	Drucksintern	373
4.6	Reaktionssintern	376
5	Eigenschaften keramischer Werkstoffe	381
5.1	Thermische Eigenschaften	381
5.1.1	Wärmedehnung	383
5.1.2	Wärmetransport	386
5.2	Mechanische Eigenschaften	390
5.2.1	Elastische Eigenschaften	390
5.2.2	Festigkeit	393
5.2.3	Hochtemperatureigenschaften	403
5.2.4	Temperaturwechselbeständigkeit	408
5.2.5	Härte	416
5.3	Elektrische Eigenschaften	424
5.3.1	Elektrische Leitfähigkeit	424
5.3.2	Dielektrische Eigenschaften	431
5.4	Magnetische Eigenschaften	436
5.5	Optische Eigenschaften	443
5.6	Chemische Eigenschaften	446
5.6.1	Grundlagen	446
5.6.2	Medienkorrosion	452
5.6.2.1	Gaskorrosion	452
5.6.2.2	Flüssigkeitskorrosion	454
5.6.2.3	Schmelzkorrosion und Salzsammelkorrosion („Hot-Corrosion“)	456
5.6.2.4	Korrosion durch Festkörperkontakt	461
5.6.3	Einfluß der Korrosion auf mechanische Eigenschaften	462
5.6.4	Experimentelle Untersuchungsmöglichkeiten	462

6	Rohstoffe	465
6.1	Natürliche Rohstoffe	466
6.1.1	Plastische Rohstoffe	468
6.1.1.1	Begriffsbestimmung für Tone und Kaoline.....	468
6.1.1.2	Entstehung der Tonminerale	470
6.1.1.3	Lagerstätten der Kaoline und Tone.....	473
6.1.1.4	Nomenklatursystem.....	478
6.1.1.5	Untersuchungsmethoden.....	483
6.1.2	Gering plastische Rohstoffe	487
6.1.3	Nicht plastische Rohstoffe	489
6.2	Synthetische Rohstoffe	494
6.2.1	Aufschluß natürlicher Rohstoffe, Raffination, Fällung und Umkristallisation	494
6.2.2	Festkörperreaktionen und Sinterverfahren	496
6.2.3	Schmelzverfahren	497
6.2.4	Reduktions- und Oxidationsverfahren	499
6.2.5	Lösungs- und Fällungsprozesse aus wässriger Lösung	502
6.2.6	Hydrothermalverfahren	503
6.2.7	Sol-Gel-Verfahren	505
6.2.8	Synthese aus reaktiven Lösungen.....	507
6.2.9	Lösungs- und Fällungsprozesse aus Schmelzen	508
6.2.10	Synthese durch Kondensation und Pyrolyse metallorganischer Vorstufen.....	509
6.2.10.1	Carbid-Synthesen	509
6.2.10.2	Nitrid-Synthesen	513
6.2.10.3	Synthesen borhaltiger Verbindungen.....	514
6.2.11	Synthese aus der Gasphase	515
6.3	Organische und anorganisch-polymere Additive	517
6.3.1	Additive für die Aufbereitung keramischer Massen	517
6.3.2	Additive für Formgebungsprozesse.....	522
6.3.3	Additive für Dekorationsverfahren.....	523
6.3.4	Additive für die Umwelttechnik.....	525
7	Keramische Verfahrenstechnik	527
7.1	Entwicklung und Bedeutung.....	527
7.2	Aufbereitung.....	535
7.2.1	Aufbereitung silicatkeramischer Massen	537
7.2.1.1	Gewinnung und Sortierung	537
7.2.1.2	Lagern und Sumpfen	539
7.2.1.3	Zerkleinerung und Homogenisierung	542
7.2.1.3.1	Feuchtaufbereitung.....	544
7.2.1.3.2	Naßaufbereitung.....	548
7.2.1.3.3	Trockenaufbereitung.....	554
7.2.2	Aufbereitung technischer Keramiken	555
7.2.2.1	Mischen	555
7.2.2.2	Mahlen	558

7.3	Formgebung	568
7.3.1	Grundlegende Betrachtungen	568
7.3.1.1	Charakterisierung von Suspensionen.....	568
7.3.1.1.1	Partikeloberflächenladung in flüssigen Suspensionen	568
7.3.1.1.2	Elektrische Doppelschicht an Partikeloberflächen	571
7.3.1.1.3	Elektrokinetische Eigenschaften und Schlickerstabilität	573
7.3.1.1.4	Rheologische Eigenschaften keramischer Suspensionen	578
7.3.1.2	Plastizität keramischer Massen	583
7.3.1.3	Granulierung.....	586
7.3.1.3.1	Granulatherstellung	586
7.3.1.3.2	Granulatcharakterisierung.....	591
7.3.2.	Formgebungsverfahren	593
7.3.2.1	Gießverfahren.....	595
7.3.2.1.1	Schlickergießen.....	595
7.3.2.1.2	Druckschlickergießen.....	597
7.3.2.1.3	Foliengießen	599
7.3.2.2	Plastische Formgebung.....	606
7.3.2.2.1	Rollerformgebung	606
7.3.2.2.2	Extrudieren	608
7.3.2.2.3	Spritzgießen.....	611
7.3.2.3	Preßverfahren	617
7.3.2.3.1	Uniaxiales Trockenpressen	617
7.3.2.3.2	Isostatisches Pressen.....	621
7.3.2.4	Neuentwicklungen	623
7.4	Trocknung.....	629
7.4.1	Feuchtigkeitsabgabe.....	629
7.4.2	Trocknungsgeschwindigkeit und Schnelltrocknung	634
7.4.3	Trockenfestigkeit	638
7.4.4	Gedächtnis der Massen	640
7.5	Brand.....	641
7.5.1	Beurteilung des Brennverhaltens	641
7.5.2	Brand silicatischer Massen	645
7.5.2.1	Phasenreaktionen	646
7.5.2.2	Glasphase	659
7.5.2.3	Brennfarben	660
7.5.2.3	Brennfehler.....	665
7.5.2.4	Schnellbrand.....	671
7.6	Glasuren und andere keramische Überzüge.....	676
7.6.1	Engoben	676
7.6.2.	Glasuren	677
7.6.2.1	Zusammensetzung.....	677
7.6.2.2	Vorgänge beim Brand	679
7.6.2.3	Eigenschaften	683

8	Silicatkeramik.....	691
8.1	Poröse silicatkeramische Werkstoffe.....	693
8.1.1	Ziegel.....	694
8.1.1.1	Werkstoffe, Technologie und Eigenschaften.....	694
8.1.1.2	Frostbeständigkeit.....	697
8.1.1.3	Ausblühungen.....	698
8.1.2	Irdengut und Töpferwaren.....	699
8.1.3	Steingut.....	699
8.2	Dichte silicatkeramische Werkstoffe.....	702
8.2.1	Steinzeug.....	703
8.2.2	Porzellan.....	704
8.2.2.1	Porzellan-Typen.....	704
8.2.2.2	Entwicklung des Gefüges im Brand.....	707
8.2.2.3	Transparenz.....	709
8.2.2.4	Mechanische Festigkeit.....	711
8.2.3	Steatit.....	713
8.2.4	Werkstoffe mit geringer Wärmedehnung.....	717
9	Feuerfeste Werkstoffe.....	719
9.1	Einführung.....	719
9.2	Eigenschaften feuerfester Werkstoffe.....	721
9.2.1	Thermisch-mechanische Eigenschaften.....	721
9.2.1.1	Feuerfestigkeit.....	721
9.2.1.2	Druckfeuerbeständigkeit (DFB), Druckerweichung (DE) und Druckfließen (DFL).....	722
9.2.1.3	Heißbiegefestigkeit (HBF).....	725
9.2.1.4	Thermische Ausdehnung.....	725
9.2.1.5	Temperaturwechselbeständigkeit (TWB).....	726
9.2.2	Thermische Eigenschaften.....	727
9.2.2.1	Wärmeleitfähigkeit.....	727
9.2.2.2	Spezifische Wärmekapazität.....	728
9.2.2.3	Volumenbezogene Wärmekapazität und Temperaturleitfähigkeit.....	729
9.2.3	Mechanische Eigenschaften.....	729
9.2.3.1	Kaltdruckfestigkeit (KDF).....	729
9.2.3.2	Elastizitäts- und Verformungsmodul.....	730
9.2.3.3	Porosität und Dichte.....	731
9.2.4	Chemische Beanspruchung.....	733
9.2.4.1	Chemische Zusammensetzung.....	733
9.2.4.2	Verschlackungsbeständigkeit.....	733
9.3	Feuerfeste Werkstoffe.....	736
9.3.1	Dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse.....	736
9.3.1.1	Silicasteine.....	736
9.3.1.2	Schamottesteine.....	740
9.3.1.3	Tonerdereiche Steine.....	745
9.3.1.4	Basische Steine.....	749
9.3.1.5	Sondererzeugnisse.....	757
9.3.1.6	Schmelzgegossene Erzeugnisse.....	759

9.3.2	Ungeformte feuerfeste Erzeugnisse.....	761
9.3.2.1	Ungeformte Erzeugnisse für monolithische Konstruktionen und Reparaturen (Massen).....	768
9.3.2.2	Verlege- und Verfugungsmaterialien (Mörtel, Kitte, Kleber).....	770
9.3.2.3	Materialien für Anstriche und Oberflächenschutz.....	771
9.3.3	Feuerleicht- und Isoliersteine.....	771
9.3.3.1	Feuerleichtsteine.....	771
9.3.3.2	Isoliersteine.....	772
9.3.4	Keramische Faserwerkstoffe.....	773
9.3.4.1	Keramische Fasertypen.....	773
9.3.4.2	Hochtemperaturverhalten keramischer Fasern.....	774
9.3.4.3	Bauteile aus keramischen Fasern.....	777
9.3.4.4	Wärmeleitfähigkeit keramischer Faserwerkstoffe.....	779
9.3.4.5	Umgang mit Keramikfasern.....	781
10	Technische Keramik.....	783
10.1	Oxidkeramik.....	784
10.1.1	Aluminiumoxid.....	785
10.1.1.1	Rohstoffe.....	785
10.1.1.2	Tonerdegewinnung.....	787
10.1.1.3	Sinterverhalten.....	793
10.1.1.4	Eigenschaften.....	801
10.1.1.5	Verwendung.....	810
10.1.2	Berylliumoxid, Magnesiumoxid und Calciumoxid.....	811
10.1.2.1	Berylliumoxid.....	811
10.1.2.2	Magnesiumoxid.....	813
10.1.2.3	Calciumoxid.....	816
10.1.3	Zirkoniumdioxid.....	817
10.1.3.1	Kristallstruktur, Rohstoffe und Herstellungsverfahren.....	817
10.1.3.2	PSZ-Keramiken.....	821
10.1.3.3	TZP-Keramiken.....	824
10.1.3.4	Umwandlungsverstärkung.....	827
10.1.3.5	Mechanische Eigenschaften.....	828
10.1.3.6	Elektrische Eigenschaften.....	832
10.1.4	Yttriumoxid, Ceriumoxid, Hafniumoxid und Thoriumoxid.....	834
10.1.4.1	Yttriumoxid.....	834
10.1.4.2	Ceriumoxid.....	836
10.1.4.3	Hafniumoxid.....	838
10.1.4.4	Thoriumoxid.....	838
10.2	Elektrokeramische Werkstoffe.....	840
10.2.1	Dielektrische Keramiken.....	841
10.2.1.1	Kondensatoranwendungen.....	841
10.2.1.2	Mikrowellenbauelemente.....	844
10.2.1.3	Substrate.....	845
10.2.2	Ferroelektrische Keramiken.....	845
10.2.2.1	Piezoelemente und -sensoren.....	847
10.2.2.2	Ferroelektrische Datenspeicher.....	851
10.2.2.3	Pyroelektrische Infrarotdetektoren.....	852
10.2.2.4	Elektrooptische Bauelemente.....	853

10.2.3	Elektronen- und ionenleitende Keramiken.....	854
10.2.3.1	Gassensoren und Hochtemperatur-Brennstoffzellen.....	854
10.2.3.2	Varistoren.....	856
10.2.3.3	Temperaturabhängige Widerstände.....	857
10.2.3.4	Keramische Supraleiter.....	859
10.3	Magnetokeramik.....	860
10.3.1	Weichmagnetische Ferrite.....	861
10.3.1.1	Ferritherstellung.....	864
10.3.1.2	Einfluß der Rohstoffe und der Herstellbedingungen.....	866
10.3.1.3	Zusammensetzung der Weichferrite und Einfluß von Zusätzen.....	868
10.3.2	Dauermagnetische Ferrite.....	869
10.3.2.1	Gitteraufbau und magnetische Eigenschaften.....	869
10.3.2.2	Einfluß von Zusätzen.....	873
10.3.2.3	Herstellungsverfahren.....	874
10.3.2.4	Eigenschaften.....	876
10.3.2.5	Anwendungen.....	878
10.4	Biokeramik.....	880
10.4.1	Biokeramik-Anwendungsbeispiele.....	880
10.4.2	Anforderungsprofil biokeramischer Werkstoffe.....	881
10.4.3	Eigenschaftsprofil von Biokeramik.....	882
10.4.4	Ausgewählte Biokeramiken.....	884
10.4.5	Zulassung von Biowerkstoffen.....	887
10.5	Nichtoxidkeramik.....	888
10.5.1	Kohlenstoff.....	891
10.5.1.1	Diamant und Graphit.....	891
10.5.1.2	Herstellung und Eigenschaften.....	893
10.5.2	Siliciumcarbid.....	897
10.5.2.1	Struktur und Phasenbeziehungen.....	897
10.5.2.2	Herstellung und Verarbeitung.....	900
10.5.2.3	Sintermöglichkeiten und Werkstofftypen.....	906
10.5.2.4	Polytypentransformation und Gefügeentwicklung beim Sintern.....	917
10.5.2.5	Eigenschaften und Verwendung.....	919
10.5.3	Siliciumnitrid.....	922
10.5.3.1	Struktur und Phasenbeziehungen.....	922
10.5.3.2	Herstellung.....	924
10.5.3.3	Eigenschaften und Anwendung.....	929
10.5.4	Borcarbid und Übergangsmetallboride.....	931
10.5.4.1	Chemische Bindung borhaltiger Werkstoffe.....	931
10.5.4.2	Borcarbid.....	932
10.5.4.3	Übergangsmetallboride.....	939
11	Verbundwerkstoffe.....	947
11.1	Metall-Keramik-Werkstoffsysteme.....	947
11.1.1	Metall-Keramik-Verbundwerkstoffsysteme.....	948
11.1.2	Fügen von Metall- und Keramikbauteilen.....	949
11.1.3	Beschichtungen.....	950
11.1.3.1	Keramik auf Metall.....	950
11.1.3.2	Metall auf Keramik.....	952
11.1.4	Reaktionsverfahren.....	952

11.2	Faserverbundwerkstoffe.....	954
11.2.1	Verstärkungsmechanismen.....	954
11.2.2	Fasern.....	956
11.2.2.1	Oxidische Fasern.....	957
11.2.2.2	Nichtoxidische Fasern.....	958
11.2.2.3	C-Fasern (Kohlefasern).....	959
11.2.3	Matrixsysteme - Herstellungsverfahren und mechanische Eigenschaften.....	961
11.2.3.1	Oxidische Matrixsysteme.....	961
11.2.3.2	SiC-Matrices.....	962
11.2.3.3	CFC-Verbundwerkstoffe.....	963
Anhang	967
1	Das internationale Einheitensystem (SI).....	967
	SI-Basiseinheiten.....	967
	Gebräuchliche abgeleitete Einheiten.....	967
	Definitionen der SI-Basiseinheiten.....	968
	Dezimale Teile und Vielfache.....	968
	Numerische Präfixe.....	969
2	Grundlegende Konstanten (Revision 1986).....	970
3	Wichtige Umrechnungsfaktoren.....	971
	Energie.....	971
	Energieäquivalente.....	971
	Druck.....	971
	Umrechnung in andere Maßsysteme.....	971
4	Das griechische Alphabet.....	972
5	R-Sätze (Gefahrenhinweise).....	973
	R-Sätze.....	973
	Kombinationen von R-Sätzen.....	974
6	S-Sätze (Sicherheitsratschläge).....	975
	Kombination von S-Sätzen.....	977
7	DIN-EN-Normen zur Prüfung keramischer Erzeugnisse.....	978
7.1	Allgemeine Definitionen.....	978
7.2	Prüfverfahren für Pulver.....	979
7.3	Prüfverfahren für monolithische Keramik.....	980
7.4	Prüfverfahren für Verbundwerkstoffe.....	982
7.5	Prüfverfahren für Schichten.....	983
7.6	Anwendungsrelevante Normen.....	983
7.7	Produktionstechnik, Fügetechnik, Korrosion und Verschleiß.....	984
8	Tabelle wichtiger Akronyme für die Materialcharakterisierung.....	985
Literaturverzeichnis	1005
Sachverzeichnis	1117