

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	Öberflächen - 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_2O_3	236
3.3.1.3	H_2O	239
3.3.2	Zweistoffsysteme	243
3.3.2.1	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	243
3.3.2.2	$\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O}$	248
3.3.2.3	$\text{SiO}_2\text{-RO}$	248
3.3.2.4	$\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$	251
3.3.2.5	H_2O -haltige binäre Systeme	257
3.3.3	Dreistoffsysteme	261
3.3.3.1	$\text{K}_2\text{O}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	262
3.3.3.2	$\text{Na}_2\text{O}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	263
3.3.3.3	$\text{Li}_2\text{O}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	264
3.3.3.4	$\text{MgO}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	266
3.3.3.5	$\text{H}_2\text{O}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{H}_2\text{O}\text{-MgO}\text{-SiO}_2$	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 Salzsenschmelzkorrosion ("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	Geringe 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	Zirconiumdioxid	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	Piezoaktoren 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-Matrizes	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 Anwendungse relevante Normen	983
7.7 Produktionstechnik, Fügetechnik, Korrosion und Verschleiß	984
8 Tabelle wichtiger Akronyme für die Materialcharakterisierung	985
Literaturverzeichnis	1005
Sachverzeichnis	1117