

W. Kollenberg (Hrsg.)

# Technische Keramik

Grundlagen  
Werkstoffe  
Verfahrenstechnik

2. Auflage



VULKAN

---

**Technische Keramik**  
**2. Auflage**

# WISSEN für die ZUKUNFT



OLDENBOURG INDUSTRIEVERLAG GMBH  
VULKAN-VERLAG GMBH  
[www.oldenbourg-industrieverlag.de](http://www.oldenbourg-industrieverlag.de) • [www.vulkan-verlag.de](http://www.vulkan-verlag.de)

Wolfgang Kollenberg (Hrsg.)

# Technische Keramik

**Grundlagen**

**Werkstoffe**

**Verfahrenstechnik**

**2. Auflage**

## **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über

**<http://dnb.ddb.de>**

abrufbar.

**ISBN 978-3-8027-2927-7**

© 2009 Vulkan-Verlag GmbH

Ein Unternehmen der Oldenbourg-Gruppe

Huyssenallee 52-56, D-45128 Essen

Telefon: (02 01) 8 20 02-0, Internet: <http://www.oldenbourg.de>

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Lektorat/Projektmanagement: Stephan Schalm

## Vorwort zur 2. Auflage

Werkstoffe sind heute mehr denn je der Schlüssel für technische Innovationen. Dabei hat die Bedeutung der Keramik in den letzten Jahren deutlich zugenommen, was nicht zuletzt auch auf den gesteigerten Bekanntheitsgrad zurückzuführen ist. So ist es auch das Ziel der 2. Auflage dieses Buches Studierende, Ingenieure, Konstrukteure und Produktentwickler mit der Herstellung und den Eigenschaften Keramischer Werkstoffe vertraut zu machen.

Die in der 1. Auflage gewählte Gesamtdarstellung mit starkem Bezug zur Praxis wurde beibehalten. Einige Kapitel (beispielsweise Aluminiumoxid oder Zirconiumoxid) wurden grundlegend überarbeitet, neue Themen, wie Kohlenstoff, Rapid Prototyping und Keramische Schichten, wurden aufgenommen.

Allen beteiligten Autoren sei an dieser Stelle herzlich für ihre Kooperation gedankt. Durch ihr Engagement haben sie bedeutenden Anteil an der Realisierung dieser 2. Auflage. Auch dem Vulkan-Verlag und seinen Mitarbeitern gilt es für die Möglichkeit das Buch herauszugeben und die gelungene Realisierung Dank zu sagen.

Rheinbach, im November 2009

Wolfgang Kollenberg

## Vorwort zur 1. Auflage

Keramische Werkstoffe übernehmen aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften in den meisten technischen Prozessen heute wichtige Funktionen. Neben den klassischen Feldern der Hochtemperaturanwendungen werden sie zunehmend im Maschinen- und Anlagenbau, der Elektronik und Elektrotechnik, der Energieerzeugung, der chemischen Verfahrenstechnik, der Medizintechnik und in vielen Bereichen des Haushalts eingesetzt. Dabei haben sie zum Teil andere Werkstoffe verdrängt, aber in weit größerem Maße neue Technologien und Anwendungen erst ermöglicht.

Mit dem vorliegenden Buch soll dem Leser ein umfassender Überblick über den Aufbau und die Eigenschaften der verschiedenen keramischen Werkstoffe sowie die Potentiale der unterschiedlichen Herstellungsverfahren gegeben werden. An Hand zahlreicher Anwendungsbeispiele wird ein Einblick in das Spektrum technischer Anwendungen gegeben.

Unter dem Begriff „Technische Keramik“ werden alle keramischen Werkstoffe zusammengefasst, die in technischen Anwendungen eingesetzt werden können. Der Bogen spannt sich von der Funktionskeramik über die Konstruktionskeramik bis zur Feuerfestkeramik.

Mit der hier gewählten Gesamtdarstellung und einem starken Bezug zur Praxis richtet sich das Buch an Studierende, Ingenieure und Konstrukteure. Die einzelnen Aspekte werden von kompetenten Fachleuten aus Industrie, Hochschule und Forschung vorgestellt. In der umfassenden Betrachtung der Themenbereiche Eigenschaften und Prüfverfahren, Werkstoffe, Verfahrenstechnik und Anwendung soll dem Leser ein aktueller und ausführlicher Überblick geboten werden.

Selbstverständlich können trotz der angestrebten Ausführlichkeit nicht alle Fragen beantwortet werden. Der Herausgeber hofft aber, eine den Bedürfnissen des angesprochenen Leserkreises entsprechende Auswahl gefunden zu haben. Zur weiteren Vertiefung einzelner Aspekte wird in den jeweiligen Kapiteln auf umfassende Literatur verwiesen. Anregungen aus dem Leserkreis zur weiteren Verbesserung des Inhaltes sind willkommen.

Den Autoren sei für ihre Kooperation herzlich gedankt. Durch ihr Engagement und ihre Mitarbeit haben sie ausschlaggebend zum Gelingen des Buches beigetragen.

Dank gilt aber auch dem Vulkan-Verlag, der sich der Aufgabe gestellt hat, ein derart umfassendes und praxisorientiertes Buch herauszugeben.

## Autorenverzeichnis

**Dr. Rainer Bartusch**

KI Keramik – Institut GmbH  
Ossietzkystraße 37a  
01662 Meissen

**Prof. Dr. Wolfgang D.G. Böcker**

Hüniger Straße 4  
14195 Berlin

**Prof. Dr. Michael Böhmer**

Fachhochschule Köln  
Institut für Werkstoffanwendungen  
Betzdorfer Straße 2  
50679 Köln

**Dr. Dieter Brunner**

AnCeram GmbH & Co.KG  
Esbachgraben 21  
95463 Bindlach

**Dr. habil. (DC) Gunter Carl**

JSJ Jodeit GmbH  
Am Naßtal 10  
07751 Jena-Mana

**Ines Durmann**

Sembach GmbH & Co.KG  
Oskar-Sembach-Straße 15  
91207 Lauf

**Dr. Andreas Gebhardt**

VITROW Spezialwerkstoffe GmbH  
Am Naßtal 5  
07751 Jena-Mana

**Prof. Dr. Georg Grathwohl**

Universität Bremen  
Am Biologischen Garten 2  
28359 Bremen

**Dr. Hermann Hald**

DLR Institut für Bauweisen- und  
Konstruktionsforschung  
Pfaffenwaldring 38-40  
70569 Stuttgart

**Dr. habil Mathias Herrmann**

Fraunhofer Institut für Keramische  
Technologien und Sinterwerkstoffe  
Winterbergstraße 28  
01277 Dresden

**Dr. Hans Hoppert**

CeramTEc ETEC GmbH  
An der Burg Sülz  
53797 Lohmar

**Markus Kindtner**

Werkstoffzentrum Rheinbach GmbH  
Lise-Meitner-Straße 1  
53359 Rheinbach

**Prof. Dr. Gernot Klein**

Fachhochschule Koblenz  
Rheinstraße 52  
56203 Höhr-Grenzhausen

**Dr. Hagen Klemm**

FhG IKTS Dresden  
Winterbergstraße 28  
01277 Dresden

**Prof. Dr. Wolfgang Kollenberg**

Werkstoffzentrum Rheinbach GmbH  
Lise-Meitner-Straße 1  
53359 Rheinbach

**Sandra Lehmann**

Werkstoffzentrum Rheinbach GmbH  
Lise-Meitner-Straße 1  
53359 Rheinbach

**Dr. Johannes Liebermann**

Hühnerberg 16  
96215 Lichtenfels

**Dr. habil. (PD) Ralph Lucke**

FIT-Ceramis  
Lindenweg 2 A  
83714 Miesbach

**Prof. Dr. Ralf Moos**

Universität Bayreuth  
Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften  
Lehrstuhl für Funktionsmaterialien  
Universitätsstraße 30  
95440 Bayreuth

**Dr. Bernhard Mussler**

Micro Systems Engineering GmbH  
Schlegelweg 17  
95180 Berg

**Dr. Detlev Nicklas**

Verband der Keramischen Industrie e.V.  
Schillerstraße 17  
95100 Selb

**Dieter Nikolay**

Werkstoffzentrum Rheinbach GmbH  
Lise-Meitner-Straße 1  
53359 Rheinbach

**Oswin Öttinger**

SGL CARBON GmbH  
Werner-von-Siemens-Straße 18  
86405 Meitingen

**Dr. Ewald Pfaff**

RWTH Aachen  
Institut für Werkstoffanwendungen im  
Maschinenbau  
Nizzaallee 32  
52072 Aachen

**Prof. Dr. Helmut Rasch**

Juchaczstraße 26 c  
56203 Höhr-Grenzhausen

**Prof. Dr. Teja Reetz**

Carriera-Straße 11  
01139 Dresden

**Prof. Dr. Hermann Riedel**

Fraunhofer-Institut für  
Werkstoffmechanik  
Wöhlerstraße 11  
79108 Freiburg

**Prof. Dr. Andreas Roosen**

Universität Erlangen-Nürnberg  
Lehrstuhl Gas und Keramik  
Martensstraße 5  
91058 Erlangen

**Stefan Rünz**

Werkstoffzentrum Rheinbach GmbH  
Lise-Meitner-Straße 1  
53359 Rheinbach

**Jochen Schilm**

Fraunhofer Institut für Keramische  
Technologien und Sinterwerkstoffe  
Winterbergstraße 28  
01277 Dresden

**Doz. Dr. Jürgen Schnapp**

Universität Jena  
Institut für Materialwissenschaft und  
Werkstofftechnologie  
Löbdergraben 32  
07743 Jena

**Prof. Dr. Hartmut Schneider**

Universität Köln  
Institut für Kristallographie  
Zülpicher Straße 49 b  
50674 Köln

**Lars Schnetter**

CeramTec-ETEC  
An der Burg Sülz 17  
53797 Lohmar

**Dr. Gerd Schwier**

Hochgrevetraße 12  
38640 Goslar

**Michael Spillner**

Dörentrup Feuerfestprodukte GmbH & Co. KG  
Lemgoer Straße 9  
32694 Dörentrup

**Dieter Sporn**

Fraunhofer-Institut für  
Silicatiforschung  
Neunerplatz 2  
97082 Würzburg

**Prof. Dr. Wolfgang Tillmann**

Technische Universität Dortmund  
Lehrstuhl für Werkstofftechnologie  
Leonhard-Euler-Straße 2  
44227 Dortmund

**Gerald Vogt**

Vogt GmbH  
Ottensooser Str. 52  
91239 Henfenfeld

**Alfred Vuin**

ZSCHIMMER & SCHWARZ GmbH & Co KG  
Chemische Fabriken  
Max - Schwarz - Straße 3-5  
56112 Lahnstein

**Hans-Jörg Walter**

Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co Kg  
Waldürner Straße 50  
74736 Hardheim

**Dr. Moritz von Witzleben**

INMATEL Technologis GmbH & Co. KG  
Heerstrassenbenden 10  
53359 Rheinbach

**Dr. Mathias Woydt**

BAM Bundesanstalt für  
Materialforschung und -prüfung  
Unter den Eichen 87  
12203 Berlin



# Inhalt

<b>Vorwort zur 2. Auflage</b> .....	V
<b>Vorwort zur 1. Auflage</b> .....	VI
<b>Autorenverzeichnis</b> .....	VII
<b>Einleitung</b> .....	1
Wolfgang Kollenberg	
<b>1. Struktur und Gefüge keramischer Werkstoffe</b> .....	7
Wolfgang Kollenberg	
<b>1.1 Atomaufbau der Elemente</b> .....	8
<b>1.2 Interatomare Bindungen</b> .....	11
<b>1.3 Aggregatzustände</b> .....	13
<b>1.4 Kristalline und amorphe Strukturen</b> .....	14
1.4.1 Kristallgitter .....	14
1.4.2 Gitterfehler .....	17
<b>1.5 Gefüge</b> .....	18
<b>1.6 Thermochemie</b> .....	22
<b>2. Eigenschaften und Prüfverfahren</b> .....	25
Georg Grathwohl, Mathias Herrmann, Hagen Klemm, Wolfgang Kollenberg, Meinhard Kuntz, Sandra Lehmann, Ralf Lucke, Ralf Moos, Teja Reetz, Jochen Schilm, Jürgen Dieter Schnapp, Mathias Woydt	
<b>2.1 Mineralogische Charakterisierung</b> .....	26
2.1.1 Erfassung der chemischen Zusammensetzung .....	26
2.1.1.1 Elementaranalyse .....	26
2.1.1.2 Atomabsorptions- (AAS) und Atomemissionsspektroskopie (AES) .....	28
2.1.1.3 Röntgenfluoreszenzanalyse (FRA) .....	29
2.1.1.4 Vergleich der Methoden zur chemischen Analytik .....	30
2.1.2 Erfassung der Phasenzusammensetzung .....	30
2.1.2.1 Röntgenbeugungsanalyse (RBA) .....	30
2.1.2.2 Infrarotspektroskopie (IR) .....	34
2.1.3 Erfassung des strukturellen Aufbaus .....	35
2.1.3.1 Lichtmikroskopie .....	35
2.1.3.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM) .....	36
2.1.4 Thermische Analyse .....	39
2.1.5 Rohstoff und Gefüge .....	43
2.1.5.1 Korngrößenanalyse .....	43
2.1.5.2 Bestimmung der spezifischen Oberfläche .....	44
2.1.5.3 Porosität .....	45
<b>2.2 Mechanische Eigenschaften</b> .....	47
2.2.1 Elastizität .....	47
2.2.1.1 Grundlagen .....	47
2.2.1.2 Messmethoden .....	49
2.2.2 Bruchmechanik .....	50
2.2.2.1 Allgemeines .....	50
2.2.2.2 Spannungsintensitätsfaktor .....	52

2.2.2.3	Risszähigkeit .....	53
2.2.2.4	Messmethoden .....	55
2.2.3	Festigkeit .....	56
2.2.3.1	Weibullverteilung .....	56
2.2.3.2	Messmethoden .....	58
2.2.3.3	Ermittlung und Darstellung der Weibull-Verteilung .....	60
2.2.3.4	Saumriss-Modell der Festigkeit .....	61
2.2.4	Unterkritisches Risswachstum .....	63
2.2.4.1	Allgemeines .....	63
2.2.4.2	Messmethoden .....	64
2.2.5	Kriechen .....	66
2.2.5.1	Grundlagen .....	66
2.2.5.2	Messmethoden .....	68
2.2.6	Härte .....	71
2.2.6.1	Allgemeines .....	71
2.2.6.2	Verfahren nach VICKERS und KNOOP .....	71
2.2.6.3	Spannungsverhalten und Verformung .....	73
2.2.6.4	Temperaturabhängigkeit .....	76
2.2.6.5	Zeitabhängigkeit .....	77
2.2.6.6	Umwelteinflüsse aus der Härte .....	78
2.2.7	Tribologisches Verhalten .....	80
2.2.7.1	Allgemeines .....	80
2.2.7.2	Grundlagen und Definitionen .....	81
2.2.7.3	Gleitreibung und -verschleiß im Trockenlauf .....	83
2.2.7.4	Gleitreibung und -verschleiß unter Misch- und Grenzreibung .....	87
<b>2.3</b>	<b>Thermische Eigenschaften</b> .....	91
2.3.1	Thermische Dehnung .....	91
2.3.1.1	Physikalische Grundlagen .....	92
2.3.1.2	Messmethoden .....	93
2.3.1.3	Anwendungsbereiche .....	94
2.3.2	Wärmeleitfähigkeit .....	95
2.3.2.1	Physikalische Grundlagen .....	95
2.3.2.2	Messmethoden .....	97
2.3.2.3	Anwendungsbereiche .....	99
<b>2.4</b>	<b>Korrosionsbeständigkeit</b> .....	101
2.4.1	Allgemeines .....	101
2.4.2	Gaskorrosion .....	101
2.4.3	Oxidation von Nichtoxiden .....	103
2.4.4	Korrosion in wässrigen Medien .....	107
2.4.5	Verträglichkeit von Keramik mit Metallen .....	112
2.4.5.1	Allgemeines .....	112
2.4.5.2	Thermodynamische und kinetische Aspekte der Verträglichkeit .....	112
2.4.5.3	Silicate .....	116
2.4.5.4	Siliciumnitrid und Siliciumcarbid .....	117
2.4.5.5	Aluminiumoxid-Keramik .....	119
2.4.5.6	Zirconiumoxidkeramiken .....	120
2.4.5.7	Yttriumoxidkeramik .....	120
<b>2.5</b>	<b>Elektrische Eigenschaften</b> .....	121
2.5.1	Isolatoren .....	123
2.5.1.1	Isolatoren und Substrate .....	123
2.5.1.2	Dielektrika .....	125
2.5.1.3	Piezoelektrika .....	126
2.5.2	Halbleitende Keramiken .....	128

# Siliciumcarbid

## individuell und korngenau

### **Vielfalt und Reinheit**

Das sind die Stärken unseres Produkts ESK-SiC. Für die nahezu unbegrenzten Einsatzgebiete und Produkte produzieren wir SiC in Grün und in Dunkel, in allen Körnungen von mehreren Millimetern bis hin in den Submikronbereich, in homogenen Qualitäten und gemischten Fraktionen. Unser ESK-SiC entspricht immer den festgelegten Anforderungen: im Standard- und Hochleistungsbereich sowie bei Spezialitäten – Korn für Korn, Charge für Charge, Lieferung für Lieferung.



### **ESK-SiC**

zeichnet sich besonders aus durch:

- hohe Reinheit
- extreme Härte
- exzellente Hochtemperatureigenschaften
- hohe Temperaturwechselbeständigkeit
- niedrige Wärmeausdehnung
- gute elektrische Leitfähigkeit
- chemische Beständigkeit

Produktion streng nach internationalen Standards

Wir entwickeln exklusiv in enger Zusammenarbeit mit ihnen genau das richtige SiC-Produkt für ihren speziellen Einsatz.

**... uns können Sie Vertrauen!**

ESK-SiC GmbH  
Günter-Wiebe-Straße 1 • 50226 Frechen • Germany  
Phone +49 (0) 22 34-94 95-0 • Fax +49 (0) 22 34-94 95-115  
info@esk-sic.com • www.esk-sic.com



2.5.2.1	NTC-Keramiken .....	129
2.5.2.2	Keramische Varistoren .....	130
2.5.2.3	PTC-Keramiken .....	131
2.5.3	Keramische Ionenleiter .....	133
2.5.3.1	Yttrium stabilisiertes Zirconiumoxid .....	133
2.5.3.2	Kationenleiter .....	134
2.5.4	Elektrisch leitfähige Keramiken .....	134
<b>2.6</b>	<b>Magnetische Eigenschaften</b> .....	<b>135</b>
2.6.1	Allgemeines .....	135
2.6.2	Grundlagen des Magnetismus .....	136
2.6.3	Struktur von hart- und weichmagnetischen Ferriten .....	139
2.6.4	Weichmagnetische Ferritwerkstoffe für technische Anwendungen .....	139
2.6.5	Hartmagnetische Ferritwerkstoffe für technische Anwendungen .....	144
<b>2.7</b>	<b>Zerstörungsfreie Prüfung</b> .....	<b>146</b>
2.7.1	Allgemeines .....	146
2.7.2	Sichtprüfung .....	149
2.7.3	Eindringprüfung .....	149
2.7.4	Klangprüfung .....	151
2.7.5	Ultraschallverfahren .....	151
2.7.6	Schallemissionsprüfung .....	155
2.7.7	Durchstrahlungsprüfung .....	156
<b>3.</b>	<b>Keramische Werkstoffe</b> .....	<b>159</b>
	Wolfgang D.G. Böcker, Dieter Brunner, Gunter Carl, Andreas Gebhardt, Mathias Herrmann, Hans Hoppert, Wolfgang Kollenberg, Johannes Liebermann, Bernhard Mussler, Dieter Nikolay, Oswin Öttinger, Ewald Pfaff, Helmut Rasch, Hartmut Schneider, Lars Schnetter, Dieter Sporn, Gerald Vogt	
<b>3.1</b>	<b>Silicatische Technische Keramik</b> .....	<b>164</b>
3.1.1	Einleitung .....	164
3.1.2	Technisches Porzellan .....	165
3.1.2.1	Allgemeines .....	165
3.1.2.2	Porzellan – der ideale Werkstoff für Hochspannungs-Isolatoren .....	165
3.1.2.3	Abbau der Gefügespannungen .....	168
3.1.2.4	Wie erreicht man eine hohe Festigkeit und ein stabiles Porzellengefüge? .....	169
3.1.2.5	Alterung des Porzellengefüges .....	171
3.1.2.6	Weitergehende Werkstoffentwicklungen .....	172
3.1.2.7	Trends und Leitlinien .....	174
3.1.2.8	Gefügeanalyse an verschiedenen Elektroporzellanen .....	182
3.1.2.9	Regeln und Richtwerte für Hersteller und Anwender .....	183
3.1.2.10	Einfluss von Bauform und Oberflächeneigenschaften auf das elektrische Verhalten .....	186
3.1.2.11	Einfluss der Splittung auf die Festigkeit .....	187
3.1.3	Steatit .....	188
3.1.4	Cordierit .....	191
3.1.4.1	Allgemeine Mineral- und Gefügeeigenschaften .....	191
3.1.4.2	Ausdehnungsanomalie als kristallographische Besonderheit .....	191
3.1.4.3	Wechselwirkungen zwischen Cordieritbildung und Werkstoffgefüge .....	193
3.1.4.4	Phasenbestand bei einer Rohstoffbasis Talk – Tonminerale – Mullit .....	194
3.1.4.5	Anwendungen von Cordierit .....	195
<b>3.2</b>	<b>Oxidische Technische Keramik</b> .....	<b>197</b>
3.2.1	Allgemeines .....	197
3.2.2	Aluminiumoxid-Keramik .....	198