

Verband der Keramischen Industrie e.V.

**B**  
**Brevier**  
**TECHNISCHE KERAMIK**

## **Impressum:**

Herausgeber: Informationszentrum Technische Keramik (IZTK)  
in Zusammenarbeit mit den  
Mitgliedsfirmen der Fachgruppe Technische Keramik im  
Verband der Keramischen Industrie e.V.

Geschäftsstelle: Verband der Keramischen Industrie e.V.  
Informationszentrum Technische Keramik  
Schillerstraße 17, 95100 Selb  
Telefon: +49 (0) 92 87 - 9 12 34  
Telefax: +49 (0) 92 87 - 7 04 92  
E-Mail: [info@keramverband.de](mailto:info@keramverband.de)  
<http://www.keramverband.de>

Verlag: Fahner Verlag, Lauf  
ISBN 3-924158-77-0

Druck: Fahner Druck GmbH, Lauf  
November 2003

Copyright: © Verband der Keramischen Industrie e.V.  
Alle Rechte vorbehalten

## Vorwort

Diese Brevier soll ein Begleiter für den Praktiker sein, ganz gleich, ob Keramikanwender oder Keramikhersteller, und ist deshalb als praktischer Helfer für den Arbeitsalltag konzipiert worden.

Zu diesem Zweck liefert es einen Überblick über keramische Werkstoffe, deren Eigenschaften, Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren und beschreibt die Grundregeln keramikgerechten Konstruierens sowie die Verbindungs- und Fügetechnik. Es ersetzt damit jedoch nicht verbindliche Herstellerangaben. Für wissenschaftliche Hintergründe verweisen wir zudem auf die in großen Umfang vorhandene Fachliteratur.

Im Bereich der Anwendungen Technischer Keramik beschränkt sich das Brevier ferner auf die tabellarische Nennung von Beispielen und die Darstellung typischer Bauteile, da Informationen hierüber in den kostenlosen Schriften des Informationszentrums Technische Keramik zu finden sind.

Das Brevier entstand auf Anregung und mit der Unterstützung der Technischen Kommission der Fachgruppe Technische Keramik im Verband der Keramischen Industrie e.V. (VKI).

Die vorliegende vierte Auflage wurde mit aller Sorgfalt komplett überarbeitet.

Es sei daher hier für die intensive Mitarbeit und das erbrachte Engagement herzlich gedankt

- allen Kommissionsmitgliedern und
- allen Spezialisten aus den Mitgliedswerken.

Verband der Keramischen Industrie e.V.  
- Informationszentrum Technische Keramik -

Selb, den 15. November 2003



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	12
<b>2</b>	<b>Geschichte der Technischen Keramik</b>	15
<b>3</b>	<b>Keramische Werkstoffe</b>	18
3.1	Definitionen	18
3.2	Werkstoffgruppen	20
3.3	Klassifizierung	22
3.4	Beschreibung der Werkstoffe	26
	<b>3.4.1 Silikatkeramik</b>	27
	3.4.1.1 Technische Porzellane	27
	3.4.1.2 Steatit	28
	3.4.1.3 Cordierit	29
	3.4.1.4 Mullitkeramik	31
	<b>3.4.2 Oxidkeramik</b>	32
	3.4.2.1 Aluminiumoxid	32
	3.4.2.2 Magnesiumoxid	35
	3.4.2.3 Zirkoniumoxid	36
	3.4.2.4 Zirkoniumoxidverstärktes Aluminiumoxid	39
	3.4.2.5 Aluminiumtitanat	40
	3.4.2.6 Titandioxide	42
	3.4.2.7 Bariumtitanate	42
	3.4.2.8 Bleizirkonattitanat	43
	3.4.2.9 Quarzglas	49
	<b>3.4.3 Nichtoxidkeramik</b>	50
	3.4.3.1 Carbide	50
	3.4.3.1.1 Siliciumcarbide	50
	3.4.3.1.2 Borcarbide	58
	3.4.3.2 Nitride	58
	3.4.3.2.1 Siliciumnitride	58
	3.4.3.2.2 SIALONe	61
	3.4.3.2.3 Aluminiumnitrid	61
	<b>3.4.4 Sonderwerkstoffe</b>	63

3.4.4.1	Faserkeramik-Verbundwerkstoffe	63
3.4.4.2	Metal-Matrix-Composits	64
<b>4</b>	<b>Vom Pulver zum Bauteil</b>	<b>67</b>
4.1	Herstellung	67
4.1.1	<b>Rohstoffe und Additive</b>	69
4.1.2	<b>Masseaufbereitung</b>	69
4.1.3	<b>Urformgebung</b>	70
4.1.4	<b>Vom Formen zum Sintern</b>	77
4.1.5	<b>Abmessungen und Schwindung</b>	81
4.1.6	<b>Abtragende Formgebungsverfahren</b>	83
4.2	Veredelung	84
4.2.1	<b>Hartbearbeitung</b>	84
4.2.2	<b>Oberflächencharakteristiken</b>	86
4.2.2.1	Geschliffene Oberflächen	86
4.2.2.2	Gehonte Oberflächen	87
4.2.2.3	Geläppte Oberflächen	88
4.2.2.4	Polierte Oberflächen	90
4.2.3	<b>Metallisieren</b>	91
4.2.4	<b>Glasieren und Engobieren</b>	91
4.2.5	<b>Keramische Schichten</b>	92
<b>5</b>	<b>Eigenschaften Technischer Keramik</b>	<b>97</b>
5.1	Allgemeiner Vergleich	97
5.2	Zuordnung nutzbarer Eigenschaften	99
5.3	Mechanische Eigenschaften	101
5.3.1	<b>Dichte</b>	101
5.3.2	<b>Porosität</b>	102
5.3.3	<b>Festigkeit</b>	103
5.3.3.1	Biegefestigkeit	103
5.3.3.2	Druckfestigkeit	105
5.3.3.3	Zugfestigkeit	105
5.3.3.4	Weibull-Modul	106
5.3.3.5	Spannungsintensitätsfaktor	108
5.3.4	<b>Elastische Eigenschaften</b>	109

5.3.4.1	E-Modul	109
5.3.4.2	Querkontraktion	110
5.3.4.3	Schubmodul	110
5.3.4.4	Risswachstum	110
5.3.4.5	Kriechverhalten	112
<b>5.3.5</b>	<b>Härte</b>	112
5.4	Thermische Eigenschaften	114
<b>5.4.1</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	114
<b>5.4.2</b>	<b>Längen-Ausdehnungskoeffizient</b>	115
<b>5.4.3</b>	<b>Temperaturwechselbeständigkeit</b>	116
5.5	Elektrische Eigenschaften	118
<b>5.5.1</b>	<b>Elektrischer Widerstand</b>	118
<b>5.5.2</b>	<b>Permittivitätszahl</b>	119
<b>5.5.3</b>	<b>Dielektrischer Verlustfaktor</b>	119
5.6	Korrosion	119
<b>5.6.1</b>	<b>Korrosionsmechanismen</b>	120
5.6.1.1	Flächenkorrosion und selektive Korrosion	120
5.6.1.2	Fehlstellenkorrosion	121
5.6.1.3	Intergranulare Korrosion	121
<b>5.6.2</b>	<b>Korrosionsarten</b>	122
5.6.2.1	Korrosion in flüssiger Phase	122
5.6.2.1.1	<i>Säuren</i>	122
5.6.2.1.2	<i>Laugen und geschmolzene Alkalien</i>	123
5.6.2.1.3	<i>Wasser</i>	123
5.6.2.2	Korrosion durch Schmelzen	123
5.6.2.2.1	<i>Nichtmetallische Schmelzen</i>	123
5.6.2.2.2	<i>Metallschmelzen</i>	124
5.6.2.3	Korrosion durch (Heiß-)Gase	124
<b>5.6.3</b>	<b>Bestimmung der Korrosion</b>	125
5.6.3.1	Flüssigphasenkorrosion	125
5.6.3.1.1	<i>Prüfbedingungen</i>	125
5.6.3.1.2	<i>Bestimmung der Korrosionshöhe</i>	125
5.6.3.2	Schmelzkorrosion	127
5.6.3.2.1	<i>Prüfbedingungen</i>	127

5.6.3.2.2	<i>Bestimmung der Korrosionshöhe</i>	127
5.6.3.3	Heißgaskorrosion	127
<b>5.6.4</b>	<b>Schlussbemerkung</b>	128
5.7	Verschleiß	128
<b>5.7.1</b>	<b>Tribologie</b>	129
5.7.1.1	Reibung	129
5.7.1.2	Tribosysteme	129
<b>5.7.2</b>	<b>Verschleißarten</b>	130
<b>5.7.3</b>	<b>Verschleißmechanismen</b>	131
<b>5.7.4</b>	<b>Beanspruchungen und deren Wirkung</b>	132
<b>5.7.5</b>	<b>Verschleißmessgrößen</b>	134
<b>5.7.6</b>	<b>Spezielle Beispiele</b>	135
5.7.6.1	Verschleißmessung in Modellsystemen	135
5.7.6.2	Verschleißschutz	137
5.7.6.3	Zerspanung	140
<b>6</b>	<b>Einsatzgebiete und Anwendungen</b>	142
6.1	Maschinenbau und Verfahrenstechnik	143
6.2	Hochtemperaturtechnik	150
6.3	Elektrotechnik	152
6.4	Elektronik	157
6.5	Medizintechnik	159
<b>7</b>	<b>Keramikgerechtes Konstruieren</b>	160
7.1	Ablauf eines Bauteilentwurfs	162
7.2	Konstruktionshinweise	165
<b>7.2.1</b>	<b>Einfluss der Materialeigenschaften</b>	165
<b>7.2.2</b>	<b>Einfluss des Formgebungsverfahrens</b>	166
<b>7.2.3</b>	<b>Modulbauweise</b>	167
7.3	Wirtschaftlichkeit	168
<b>7.3.1</b>	<b>Prinzipielle Bauteilkosten</b>	168
<b>7.3.2</b>	<b>Bauteilkosten in der Serie</b>	168
<b>7.3.3</b>	<b>Wirtschaftlichkeit im System</b>	169
7.4	Festigkeitsauslegung	169

7.5	Gestalten von Bauteilen	170
7.5.1	<b>Grundregeln</b>	170
7.5.2	<b>Möglichkeiten zur Belastbarkeitssteigerung</b>	172
7.5.3	<b>Beispiele</b>	173
7.5.3.1	Einfache Formen anstreben	173
7.5.3.2	Spannungsspitzen vermeiden	174
7.5.3.3	Zugspannungen minimieren	175
7.5.3.4	Materialanhäufungen vermeiden	176
7.5.3.5	Nachbearbeitung minimieren	177
7.5.3.6	Fertigungsspezifische Besonderheiten	178
7.6	Zusammenfassung wichtiger Leitideen	184
<b>8</b>	<b>Verbindungs- und Fügechnik</b>	186
8.1	Grundsätze	186
8.2	Verfahren	188
8.2.1	<b>Kraft- und Formschluss</b>	192
8.2.1.1	Spannungsspitzen vermeiden	192
8.2.1.2	Druckbeanspruchung bevorzugen	192
8.2.1.3	Schlagbeanspruchung vermeiden	193
8.2.1.4	Wärmedehnung beachten	193
8.2.1.5	Schonende Krafteinleitungen	194
8.2.1.6	Kraftflüsse anpassen	195
8.2.2	<b>Umspritzen mit Kunststoff</b>	196
8.2.3	<b>Kleben</b>	197
8.2.3.1	Klebstoffarten	198
8.2.3.2	Beispiel: Drehmomentübertragung	198
8.2.3.3	Weitere Anwendungen	200
8.2.4	<b>Löten</b>	202
8.2.4.1	Weichlöten	202
8.2.4.2	Hartlöten	203
8.2.4.3	Aktivlöten	203
8.2.4.4	Maßnahmen	204
<b>9</b>	<b>Qualität</b>	205
9.1	Qualität planen	205

9.2	Qualität produzieren	205
9.3	Qualität managen	206
9.4	Prüfungen (Q-Nachweis)	206
9.5	Qualitätstechniken	207
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>209</b>
10.1	Bindungsarten und Festigkeit	209
10.2	Werkstoffvergleich	210
10.3	Allgemeintoleranzen für Maße und Formen	212
<b>10.3.1</b>	<b>Toleranzen und Funktion</b>	<b>212</b>
<b>10.3.2</b>	<b>Allgemeintoleranzen für Maße</b>	<b>213</b>
10.3.2.1	Keramik „as fired“	213
10.3.2.2	Keramik hartbearbeitet	214
<b>10.3.3</b>	<b>Allgemeintoleranzen für Form</b>	<b>218</b>
10.3.3.1	Keramik „as fired“	218
10.3.3.2	Keramik hartbearbeitet	221
<b>10.3.4</b>	<b>Praxisbeispiele nach dem Stand der Technik</b>	<b>223</b>
10.3.4.1	Verschleißschutzplatten	223
10.3.4.2	Platten als Brennhilfsmittel	223
10.3.4.3	Transportrollen für Rollenöfen	224
10.4	Abstimmung von Prüfverfahren	225
10.5	Messverfahren	226
<b>10.5.1</b>	<b>Biegefestigkeit</b>	<b>226</b>
10.5.1.1	3-Punkt-Biegefestigkeit	227
10.5.1.2	4-Punkt-Biegefestigkeit	228
<b>10.5.2</b>	<b>Härte</b>	<b>230</b>
<b>10.5.3</b>	<b>E-Modul</b>	<b>231</b>
<b>10.5.4</b>	<b>Oberflächen</b>	<b>231</b>
10.5.4.1	Definitionen	231
10.5.4.2	Hartbearbeitete Oberflächen	234
10.5.4.3	Materialanteile/(Traganteile) $M_r$	236
10.5.4.4	Rauheitsprofile	237

10.6	Qualität	239
10.6.1	<b>Statistische Auswertung – Übersicht</b>	239
10.6.2	<b>Statistische Methoden</b>	241
10.6.2.1	Rechengrößen	241
10.6.2.2	Regelkarten	242
10.6.2.3	Prozessfähigkeitsanalyse	243
10.6.3	<b>Statistische Prozessführung</b>	246
10.7	Normen zu Technischer Keramik	248
10.7.1	<b>Allgemein</b>	248
10.7.2	<b>Prüfverfahren für Pulver</b>	250
10.7.3	<b>Prüfverfahren für monolithische Keramik</b>	252
10.7.4	<b>Prüfverfahren für Verbundwerkstoffe</b>	255
10.7.5	<b>Prüfverfahren für Schichten</b>	257
10.7.6	<b>Normen zu Anwendungen</b>	258
10.7.7	<b>Weitere zitierte Normen</b>	258
10.8	Umrechnung in andere Maßsysteme	260
10.9	Eigenschaftstabellen	262
10.9.1	<b>Werkstoffe nach DIN EN 60 672-3</b>	263
10.9.1.1	Alkali-Aluminiumsilikate (C 100)	263
10.9.1.2	Magnesiumsilikate (C 200)	264
10.9.1.3	Titanate (C 300)	265
10.9.1.4	Erdalkali-Aluminiumsilikate (C 400)	266
10.9.1.5	Aluminium- und Magnesiumsilikate (C 500)	267
10.9.1.6	Mullit (C 600) und Aluminiumoxid (C 700)	268
10.9.1.7	Andere Oxide (C 800) und Nichtoxide (C 900)	269
10.9.2	<b>Nicht genormte Hochleistungswerkstoffe</b>	270
10.9.2.1	Oxidkeramiken	270
10.9.2.2	Carbide	271
10.9.2.3	Nitride	272
10.9.2.4	Weitere Werkstoffe	273
10.9.3	<b>Übersicht zur chemischen Beständigkeit</b>	274
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	278
<b>12</b>	<b>Register</b>	280

# 1 Einführung

Wissenschaft und Technik stehen in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess. Dabei führt der Weg zu immer anspruchsvolleren, intelligenteren Technologien.

Mit derselben Dynamik steigen auch die Ansprüche, die an moderne Werkstoffe gestellt werden. Gefordert werden unter anderem höhere Festigkeiten für Material sparende Konstruktionen, leichtere Bauteile zur Energieeinsparung, höhere Qualität für mehr Sicherheit sowie längere Lebensdauer. Schließlich spielt die Wirtschaftlichkeit eine ganz entscheidende Rolle.

Keramische Werkstoffe haben zu diesem Innovationsprozess bisher einen wichtigen Beitrag geleistet.

Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz von Keramik sind werkstoffgerechte Konstruktion und Fertigung sowie keramikgerechte Anwendung. Es geht heute nicht um die Verdrängung von herkömmlichen Werkstoffen, vielmehr ermöglichen „maßgeschneiderte“ Produkte völlig neue Problemlösungen.

### **Der Weg zum keramischen Bauteil**

Um die Eigenschaften von Keramik sinnvoll und effektiv nutzen zu können, reicht es nicht, ein vorhandenes Bauelement aus herkömmlichem Werkstoff detailgetreu in Keramik umzusetzen. Die Zeichnung des bislang genutzten Bauteils kann aber mit etlichen zusätzlichen Informationen den Weg zum keramischen Serienbauteil zeigen.

Dabei müssen die thermischen, elektrischen, mechanischen und chemischen Belastungen berücksichtigt werden. Aufgrund der jeweiligen Schlüsselbelastungen lassen sich ein oder mehrere Werkstoffe aus der Menge der Keramiken herausfiltern. Hierbei sind die Werkstofftabellen und Werkstoffbeschreibungen in den folgenden Kapiteln hilfreich.

Der neue keramische Werkstoff muss den Analysen der technischen Problemstellung genügen, darüber hinaus ein angemessenes Preis-Leistungs-Verhältnis über seine gesamte Lebenszeit und ggf. einen Zusatznutzen bieten.

Danach wird die Zeichnung auf Umsetzbarkeit geprüft und für die Herstellung optimiert.

Die geforderten Toleranzen sind oft metalltypisch, d. h. für alle Flächen relativ eng. Um die Kosten zu optimieren, ist eine Unterscheidung zwischen keramischtypischen, allgemeinen Toleranzen und speziellen Toleranzen für Funktionsflächen notwendig.

In einigen Fällen sind auch die Funktionsprinzipien und damit die Neukonstruktion der Baugruppe zu diskutieren.

Bei dem eben beschriebenen Prozess wird der Anwender vom Keramikhersteller begleitet.

Nach der technischen Klärung kann der Keramikhersteller unter Berücksichtigung der Stückzahl das optimale Fertigungsverfahren auswählen und ein Angebot unterbreiten.

## **Keramik heute**

Keramik hat sich bis heute in einer Vielzahl von Anwendungen bewährt bzw. wird für neue in Betracht gezogen, bei denen hohe Härte, große Verschleißbeständigkeit, hohe Korrosionsbeständigkeit und gute Hochtemperaturstabilität – verbunden mit niedrigem spezifischen Gewicht – benötigt werden. Die neuen HighTech-Werkstoffe erreichen hohe Festigkeiten. Ihre Werte sind vergleichbar mit den Werten von Metallen und übertreffen in der Regel alle Polymere.

Die Eigenschaften der keramischen Werkstoffe werden maßgeblich durch das jeweilige Gefüge – beziehungsweise die Mikrostruktur – bestimmt. Durch die gezielte Einstellung von bestimmten Mikrostrukturen, das so genannte Gefügedesign, können die mechanischen und physikalischen Kennwerte in unterschiedliche Richtungen hin beeinflusst werden.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt ist bei der Anwendung von Keramik immer zu berücksichtigen: „Keramik ist spröde“! Metallische Konstruktionswerkstoffe sind auf Grund ihrer Duktilität „ausgewogene und gutmütige“ Werkstoffe, die auch einmal leichtere konstruktive Fehler verzeihen (Fehlertoleranz), da sie in der Lage sind, lokale Spannungsspitzen durch elastische und plastische Verformung abzubauen.

Darüber hinaus zeichnen sich die Metalle in der Regel durch eine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie durch Kennwerte aus, die unabhängig von der Raumrichtung sind.

## Einführung

---

Keramische Werkstoffe hingegen sind in der Regel elektrisch und thermisch isolierend, haben eine hohe Härte und können eine sehr niedrige Wärmedehnung besitzen. Durch das Fehlen der plastischen Verformbarkeit sind sie außerdem außerordentlich formstabil. Es werden Druckfestigkeiten erreicht, die das zehnfache der Biege- und Zugfestigkeit betragen können. Gegenüber Metallen ist die Keramik besonders für den Einsatz bei hohen Temperaturen geeignet, da die Kennwerte der keramischen Werkstoffe durch Temperaturbelastungen weitaus weniger und erst bei höheren Gradzahlen beeinflusst werden als die der Metalle. Ähnlich positiv verhält sich Keramik in Bezug auf Korrosion und Verschleiß.

Wegen dieser Vorteile begegnet uns Technische Keramik auf Schritt und Tritt. Ohne keramische Isolierteile würden viele Haushaltsgeräte nicht funktionieren. Ebenso wäre ohne Isolatoren und Sicherungsbau- teile aus Technischer Keramik eine zuverlässige Stromversorgung nicht denkbar. Keramische Substrate und Bauteile bilden die Grundlage für Komponenten und Baugruppen in allen Bereichen der Elektronik, und im Maschinen- und Anlagenbau sorgen Gleit- und Regelelemente für verschleiß- und korrosionsfreie Funktion. Bei Industrieöfen in der Hoch- temperaturtechnik ist Keramik als Konstruktions- und Isolationswerk- stoff unverzichtbar! Schon diese wenigen Beispiele zeigen deutlich, dass Technische Keramik in unserer Welt eine wichtige Rolle spielt. Allerdings sind keramische Bauteile in der Regel nicht auf den ersten Blick sichtbar. Sie spielen dennoch in konventionellen Anwendungen und auch bei innovativen Produkten eine entscheidende Rolle.

Das Potenzial der Technischen Keramik ist noch nicht ausgeschöpft.

## 2 Geschichte der Technischen Keramik

Die Nutzung keramischer Werkstoffe hat bereits in der Frühgeschichte der Menschheit begonnen. Nach gesicherten archäologischen Untersuchungen wurden vor mehr als 24.000 Jahren erste figürliche Keramiken aus bildsamen keramischen Massen geformt und durch den Brand verfestigt. Mehr als 10.000 Jahre später mit dem Sesshaftwerden der Menschen entstanden in Mesopotamien und Indien die ersten Ziegelsteine. Vor 7.000 bis 8.000 Jahren wurden dann in Mitteleuropa die ersten Nutzgefäße produziert.

Zum Bau von Schmelz- und Prozessöfen in der Hüttentechnik wurden bis zum Ende des Mittelalters natürliche Sandsteine mit kaolinitischer oder kieseliger Bindung verwendet. Die Entwicklung synthetischer, feuerfester Werkstoffe (Agricola, Freiberg um 1550) war eine Grundlage für die Industrielle Revolution und schuf die Voraussetzungen für das großtechnische Erschmelzen von Metallen und Glas, für die Herstellung von Koks, Zement und Keramik.

Die keramische Industrie war ein wichtiger Begleiter der Chemie. Säurefestes Steinzeug und Porzellan waren lange Zeit die wichtigsten Korrosionsschutzwerkstoffe. Heute sind sie weitgehend durch säurefeste Stähle und Emails, aber auch durch Oxid-, Nitrid- und Carbidkeramiken ersetzt.

Beginnend mit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde die Elektrokeramik zur Haupttriebkraft der industriellen Entwicklung. In dieser Zeit wurden die grundlegenden Lösungen für die elektrische Isolation auf der Basis von Porzellan geschaffen.

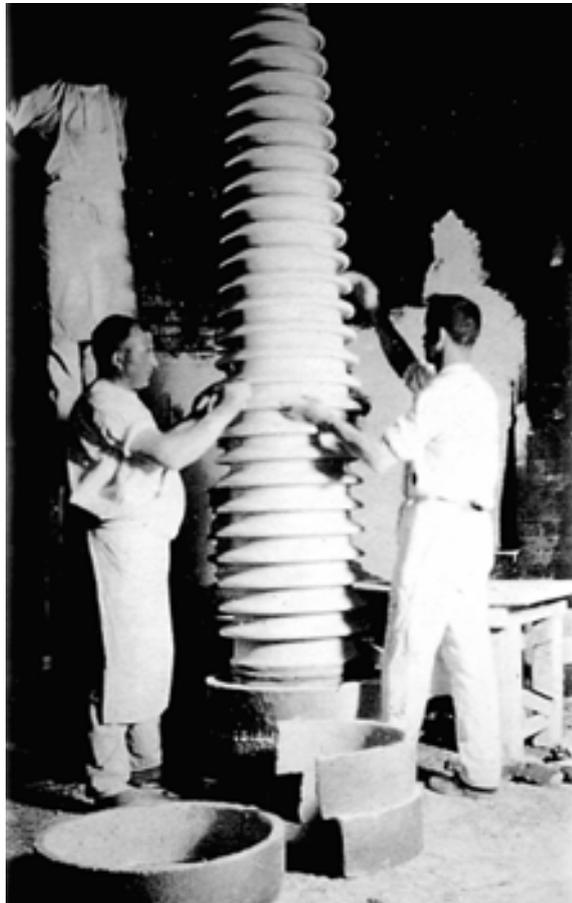
Es ist schwierig, einen Zeitpunkt für den Beginn der neuen Hochleistungskeramikwerkstoffe festzulegen. Bis zur Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert hatte die Entwicklung der keramischen Werkstoffe vorwiegend empirischen Charakter, wissenschaftliche Methoden fanden erst im Laufe des 20. Jahrhunderts Eingang.

Mit Quarzporzellan wurden durch Verbesserung der Fertigungstechnologie erstmalig Biegefestigkeiten von mehr als 100 MPa erreicht. Erst in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts gelang durch die systematische Entwicklung des Tonerdeporzellans eine deutliche Steigerung der

## Geschichte

---

Festigkeit, die insbesondere bei Großisolatoren für Spannungen über 220 kV zu einer beträchtlichen Gewichtsreduzierung führte.



**Bild 1:** Isolatorherstellung um 1920

Mit der Verbreitung des Rundfunks in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden spezielle keramische Isolationswerkstoffe erforderlich, die sich beim Einwirken hochfrequenter Felder nicht erwärmten. Diese Entwicklungen führten zu den heute noch verwendeten Werkstoffen Steatit und Forsterit. Die Erforschung der oxidischen Magnetwerkstoffe begann in den 40er Jahren (Hartferrite, Weichferrite). Zu diesem Zeitpunkt entstanden auch die Kondensatorwerkstoffe auf der Basis von Titanoxid und begannen Untersuchungen über die ferroelektrischen und piezoelektrischen Eigenschaften der Perowskite ( $\text{BaTiO}_3$  etc.). Dadurch wurde eine breite Palette von Werkstoffen – auch mit halbleitenden Eigenschaften – für Sensoren, frequenzselektive Bauelemente (Filter) und Kondensatoren hoher Flächenkapazität geschaffen. Theoretische Ansätze hierzu leiten sich aus grundlegenden Arbeiten von Heisenberg, Dirac, Heitler, Londas, Hartre, Fock u. a. ab.

Ein weiterer, wichtiger Meilenstein war die Einführung des Zündkerzenisolators aus Sinterkorund (Siemens, 1929). Mit der Entwicklung der Mikroelektronik stieg der Bedarf an Aluminiumoxidwerkstoffen, Beispiele hierfür sind Materialien für Substrate und Gehäuse. Eine wichtige Eigenschaft – neben hohem Isolationswiderstand, geringen dielektrischen Verlusten, hoher Wärmeleitfähigkeit, hoher mechanischer Festigkeit und Thermoschockbelastbarkeit – ist die Vakuumdichtigkeit dieser neuen Werkstoffgruppe.

Während sich die thermischen Eigenschaften nach der Theorie von Debye ausreichend interpretieren ließen, war es zur Erklärung der mechanischen Eigenschaften erforderlich, die Bruchmechanik zu entwickeln. Kamen als keramische Konstruktionswerkstoffe zunächst Aluminiumoxid und später auch Zirkoniumoxid zum Einsatz, so, wurden Ende der 60er Jahre des 20. Jahrhunderts die hervorragenden Eigenschaften der kovalentgebundenen Werkstoffe auf Siliciumbasis (Siliciumcarbid, Siliciumnitrid, SIALONe u. a.) erkannt und genutzt. Die Forschung zu allen Werkstoffen ist bis heute aktuell geblieben.

Neben den Konzepten der Bruchmechanik wurden neue mathematische Methoden und die Computersimulation entwickelt, um die Beziehungen zwischen Gefüge und Eigenschaften durch Modelle zu erfassen. Parallel zur theoretischen Entwicklung erfolgte die Optimierung der Verfahrenstechnik bis zur Schaffung völlig neuer Prozessabläufe und Sinterverfahren.

Kontinuierlich werden weiterhin bekannte Werkstoffe verbessert, neue Werkstoffe entwickelt und neue Anwendungen erschlossen. Die Werkstoffe von heute sind nicht mehr mit den Materialien zu vergleichen, die vor zehn oder zwanzig Jahren auf dem Markt waren. Wissenschaftliche Forschung fördert das werkstoffkundliche Verständnis. Verbesserte und neue Fertigungstechnologien sorgen für Fortschritte bei Qualität, Reproduzierbarkeit und Betriebssicherheit.

# 3 Keramische Werkstoffe

## 3.1 Definitionen

Im Folgenden wird die Terminologie dargestellt, die derzeit in der Technischen Keramik üblich ist und industrielle Bedeutung besitzt.

**Keramik** ist ein Werkstoffbegriff, der wegen der Vielfältigkeit der einbezogenen Rohstoffe und Anwendungen mit historisch gewachsenen Begriffen arbeitet. Viele systematische Gliederungen auf nationaler Basis beginnen erst jetzt im Zuge der internationalen Zusammenarbeit von Wissenschaft, industrieller Normung und internationaler Handelsstatistik langsam Gemeinsamkeiten zu entwickeln.

Als Minimaldefinition kann gelten:

**Keramische Werkstoffe** sind anorganisch und nichtmetallisch. In der Regel werden sie bei Raumtemperatur aus einer Rohmasse geformt und erhalten ihre typischen Werkstoffeigenschaften durch einen Sintervorgang bei hohen Temperaturen. (s. a. Hochleistungskeramik!)

Dagegen umfasst der Begriff „**ceramics**“ im angelsächsischen Sprachgebrauch zusätzlich u. a. auch Glas, Email, Glaskeramik und anorganische Bindemittel (Zement, Kalk, Gips).

Die Keramische Industrie in Deutschland unterteilt je nach Kornaufbau des Masseversatzes in **Grob-** und **Feinkeramik**. Die Definition nach Hausner führt über das Gefüge des Scherbens, also ebenfalls über den Kornaufbau. Die Grenze liegt bei Korngrößen von etwa 0,1 bis 0,2 mm. Sind die Gefügebestandteile kleiner als 0,1 mm, also mit dem bloßen Auge nicht mehr erkennbar, spricht man im deutschen Sprachgebrauch – unabhängig vom Werkstoff – von Feinkeramik.

Zur Feinkeramik gehören **Technische Keramik**, Geschirrk Keramik, Zierkeramik, Sanitärkeramik, Wand- und Bodenfliesen sowie Schleifmittel auf keramischer Basis.

Grobkeramik beinhaltet z. B. Ziegel- oder konventionelle Feuerfestwerkstoffe.

**Technische Keramik** umfasst keramische Produkte für technische Anwendungen.

In der Literatur auftretende Begriffe wie

- Hochleistungskeramik,
- Strukturkeramik,
- Konstruktionskeramik,
- Industriekeramik,
- Ingenieurkeramik,
- Funktionskeramik,
- Elektrokeramik,
- Schneidkeramik und
- Biokeramik

beschreiben spezielle Aspekte der Technischen Keramik. Eine Einteilung nach diesen Begriffen ist nicht sinnvoll, da sie sich z. T. stark überschneiden.

**Hochleistungskeramik** ist in **DIN V ENV 12212** definiert als „hoch entwickelter, hoch leistungsfähiger keramischer Werkstoff, der überwiegend nichtmetallisch und anorganisch ist und über bestimmte zweckmäßige Eigenschaften verfügt.“

Der Begriff **Hochleistungskeramik** wird vor allem in Abgrenzung zu traditioneller Keramik auf Tonbasis einschließlich Geschirrporzellan, Sanitärkeramik, Wand- und Bodenfliesen sowie Baukeramik verwendet. Diese Definition deckt sich mit der Formulierung der „Japan Fine Ceramics Association“.

**Struktur-** oder auch **Konstruktionskeramik** sind nicht genormte Begriffe, unter denen man Werkstoffe versteht, die in irgendeiner Form mechanischen Belastungen standhalten müssen, z. B. Biege- und Druckspannungen. Praktisch identische Bedeutung haben die Begriffe **Industrie-** und **Ingenieurkeramik**.

**Funktionskeramik** ist Hochleistungskeramik, bei der die innewohnenden Eigenschaften des Werkstoffs für eine aktive Funktion verwendet werden, z. B. bei keramischen Bauelementen, die elektrische, magnetische, dielektrische oder optische Kennwerte aufweisen.

**Elektrokeramik** ist Hochleistungskeramik, die aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften in Elektrotechnik und Elektronik eingesetzt wird. Die allgemeine Elektrotechnik nutzt vor allem die Isolierfähigkeit und die mechanische Festigkeit, die Elektronik darüber hinaus auch Eigenschaften wie ferroelektrisches Verhalten, Halbleitung, nicht linearen Widerstand, Ionenleitung und Supraleitung.

**Schneidkeramik** ist Hochleistungskeramik, die aufgrund hervorragender Verschleiß- und Hitzebeständigkeit als Werkzeug zur spanenden Bearbeitung (Drehen, Bohren, Fräsen) geeignet ist.

**Biokeramik** ist Hochleistungskeramik für den Einsatz im medizinischen Bereich d. h. im menschlichen Körper und beinhaltet z. B. Erzeugnisse, die Knochen, Zähne oder hartes Gewebe reparieren oder ersetzen.

Weitere Definitionen sind in DIN EN 12 212 enthalten.

### 3.2 Werkstoffgruppen

Technische Keramik wird oft mit den vorgenannten Begriffen in Gruppen eingeteilt. Da jedoch damit keine eindeutige Klassifizierung möglich ist, werden die Werkstoffe alternativ entsprechend ihrer mineralogischen bzw. chemischen Zusammensetzung gegliedert.

Zu den Werkstoffen der Technischen Keramik gehören die folgenden Gruppen:

- Silikatkeramik
- Oxidkeramik
- Nichtoxidkeramik

**Silikatkeramik** als älteste Gruppe aller Keramiken hat einen dominierenden Anteil an den feinkeramischen Erzeugnissen. Wesentliche Bestandteile dieser mehrphasigen Werkstoffe sind Ton und Kaolin,

Feldspat und Speckstein als Silikatträger. Daneben werden auch Komponenten wie Tonerde und Zirkon zur Erzielung spezieller Werkstoffeigenschaften, z. B. hoher Festigkeiten, verwendet. Im Sinterbrand entsteht neben den kristallinen Phasen meist ein hoher Anteil (> 20 %) an Glasphase, deren wesentlicher Bestandteil Siliciumoxid ( $\text{SiO}_2$ ) ist.

Zu den Werkstoffen der Silikatkeramik zählen

- Porzellan,
- Steatit,
- Cordierit und
- Mullit.

Wegen relativ niedriger Sintertemperaturen, guter Prozessbeherrschung und hoher Verfügbarkeit der natürlichen Rohstoffe ist die Silikatkeramik wesentlich kostengünstiger als Oxid- oder Nichtoxidkeramik. Letztere benötigen aufwändig hergestellte synthetische Pulver und hohe Sintertemperaturen.

Silikatkeramik kommt z. B. in der Wärmetechnik, der Mess- und Regeltechnik, der Verfahrens- und Umwelttechnik, der Hoch- und Niederspannungstechnik mit typischen Anwendungen, wie Isolatoren, Sicherungspatronen, Katalysatoren, Gehäusen sowie bei vielfältigen Anwendungen in der Elektroinstallationstechnik zum Einsatz. Silikatkeramik findet sich weiterhin im Feuerfestbereich wieder.

Unter **Oxidkeramik** werden alle Werkstoffe verstanden, die im Wesentlichen aus einphasigen und einkomponentigen Metalloxiden (> 90 %) bestehen. Die Materialien sind glasphasearm oder glasphasefrei. Die Rohstoffe werden synthetisch hergestellt und besitzen einen hohen Reinheitsgrad. Bei sehr hohen Sintertemperaturen entstehen gleichmäßige Mikrogefüge, die für die verbesserten Eigenschaften verantwortlich sind.

Einige Vertreter der Oxidkeramik als Beispiele für

- ein Einstoffsystem sind
  - Aluminiumoxid,
  - Magnesiumoxid,
  - Zirkoniumoxid,
  - Titandioxid (Kondensatorwerkstoff) und für

- ein Mehrstoffsystem sind
  - als Mischoxidkeramik
    - Aluminiumtitanat,
    - Bleizirkonattitanat (Piezokeramik),
  - als Dispersionskeramik
    - mit Zirkoniumoxid verstärktes Aluminiumoxid (ZTA -  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ ).

Die Oxidkeramik kommt in Elektrotechnik und Elektronik und vielfach als Strukturwerkstoff, also für nichtelektrische Anwendungen zum Einsatz. Sie bietet die dafür geeigneten typischen Eigenschaften wie Bruchzähigkeit, Verschleiß- und Hochtemperaturfestigkeit sowie Korrosionsbeständigkeit.

Die **Nichtoxidkeramik** beinhaltet keramische Werkstoffe auf der Basis von Verbindungen von Bor, Kohlenstoff, Stickstoff und Silicium. (Kohlenstoffprodukte aus amorphem Graphit gehören **nicht** dazu!)

In der Regel weisen Nichtoxidkeramiken einen hohen Anteil kovalenter Bindungen auf. Diese ermöglichen hohe Einsatztemperaturen, sorgen für hohen Elastizitätsmodul und verleihen hohe Festigkeit und Härte, verbunden mit hoher Korrosionsbeständigkeit und Verschleißbeständigkeit.

Die wichtigsten Nichtoxidkeramiken sind

- Siliciumcarbid,
- Siliciumnitrid,
- Aluminiumnitrid,
- Borcarbid und
- Bornitrid.

### 3.3 Klassifizierung

#### Frühzeitige Normung

Das grundsätzlich notwendige Sicherheitsdenken der Anwender führte schon sehr bald zur Normung keramischer Werkstoffe durch den Verband Deutscher Elektrotechniker, kurz VDE genannt. Nur solche Werk-

stoffe, die den festgelegten Anforderungen entsprachen, wurden für die Anwendungen in der Elektrotechnik zugelassen.

Die Bedeutung der Normung „keramischer Werkstoffe für die Elektrotechnik“ wird dadurch unterstrichen, dass das deutsche Vorschriftenwerk DIN 40 685 / VDE 0335 jahrzehntelang auf nationaler und internationaler Ebene in der Elektrotechnik verbindlich war. Die überarbeitete Norm ist als **DIN EN 60 672** erschienen.

Dort genormte Werkstoffe entsprechen Gruppen (100, 200 usw.) und sind mit Typ-Nummern (C ...)<sup>1</sup> gekennzeichnet.

Da diese und weitere Werkstoffe auch außerhalb der Elektrotechnik eine große Bedeutung haben, wurde im Rahmen des „Europäischen Komitees für Normung“ (CEN) eine Norm zur Klassifizierung von Merkmalen Technischer Keramiken als EN 12 212 erarbeitet und in der deutschen Version als **DIN EN 12 212** veröffentlicht.

Beide Normen unterscheiden sich grundsätzlich:

In der DIN EN 60 672 werden an definierte keramische Werkstoffe kurze Typbezeichnungen vergeben und Mindestanforderungen beschrieben. Diese Werkstoffbezeichnungen (z. B. C 799) werden vielfach in technischen Zeichnungen eingetragen.

Dagegen ist DIN EN 12 212 ein flexibles System, mit dem unmittelbar einzelne Kennungen codiert werden können.

Darüber hinaus definiert die europäische Vornorm **prENV 14 232** wichtige Grundbegriffe der Hochleistungskeramik und formelhafte Kurzbezeichnungen für keramische Werkstoffe, die oft auch Hinweise auf die Herstellung enthalten.

In Tabelle 1 sind die Werkstoffe für Isolierzwecke nach DIN EN 60 672 mit der entsprechenden Werkstoffbezeichnung (C ...) gekennzeichnet und Werkstoffe nach Herstellerspezifikation – wo immer möglich mit Abkürzungen nach DIN ENV 14 232 bezeichnet.

---

<sup>1</sup> Die alten Bezeichnungen nach VDE 0335 mit KER... sind nicht mehr gültig!

## Silikatkeramik

### **Alkali-Aluminiumsilikate ..... (C 100)**

Quarzporzellane, plastische Formgebung .....	C 110
Quarzporzellane, gepresst .....	C 111
Cristobalitporzellane, plastische Formgebung .....	C 112
Tonerdeporzellane .....	C 120
Tonerdeporzellane, hochfest .....	C 130
Lithiumporzellane .....	C 140

### **Magnesiumsilikate ..... (C 200)**

Niederspannungssteatite .....	C 210
Standartsteatite .....	C 220
Steatite mit niedrigem Verlustwinkel .....	C 221
Poröse Steatite .....	C 230
Forsterite, porös .....	C 240
Forsterite, dicht .....	C 250

### **Erdalkali-Aluminiumsilikate und Zirkonporzellane ..... (C 400)**

Cordierite, dicht .....	C 410
Celsiane, dicht .....	C 420
Basis Kalziumoxid, dicht .....	C 430
Basis Zirkon, dicht .....	C 440

### **Poröse Aluminiumsilikate und Magnesium-Aluminiumsilikate (C 500)**

Aluminiumsilikatbasis .....	C 510
Magnesium-Aluminiumsilikatbasis .....	C 511
Magnesium-Aluminiumsilikatbasis .....	C 512
Cordieritbasis .....	C 520
Aluminiumsilikatbasis .....	C 530

### **Mullit-Keramik mit niedrigem Alkaligehalt ..... (C 600)**

Mullit-Keramik mit 50 % bis 65 % $Al_2O_3$ .....	C 610
Mullit-Keramik mit 65 % bis 80 % $Al_2O_3$ .....	C 620

## Oxidkeramik

### **Titanate und andere Keramiken hoher Permittivitätszahl ... (C 300)**

Basis Titandioxid .....	C 310
Basis Magnesiumtitanate .....	C 320
Titandioxid und andere Oxide .....	C 330
Titandioxid und andere Oxide .....	C 331
Basis Kalzium- und Strontiumwismuttitanat .....	C 340
Basis ferroelektrische Perowskite .....	C 350
Basis ferroelektrische Perowskite .....	C 351

<b>Keramikwerkstoffe mit hohem Aluminiumoxidgehalt</b> .....	<b>(C 700)</b>
Hoch Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -haltige Keramik; > 80 % bis 86 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	C 780
Hoch Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -haltige Keramik; > 86 % bis 95 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	C 786
Hoch Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -haltige Keramik; > 95 % bis 99 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	C 795
Hoch Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -haltige Keramik; > 99 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	C 799
Aluminiumoxid .....	RBAO *
 <b>Oxidkeramikwerkstoffe anderer Art</b> .....	 <b>(C 800)</b>
Berylliumoxid, dicht .....	C 810
Magnesiumoxid (MgO), porös .....	C 820
Magnesiumoxid .....	MgO *
Zirkoniumoxid (ZrO <sub>2</sub> ) .....	(C 830) <sup>2</sup>
teilstabilisiertes Zirkoniumoxid .....	PSZ *
vollstabilisiertes Zirkoniumoxid .....	FSZ *
tetragonales polykristallines Zirkoniumoxid .....	TZP *
Aluminiumtitanat .....	ATI *
Bleizirkonattitanat (Piezokeramik) .....	PZT *
Quarzgut (SiO <sub>2</sub> ) .....	SiO <sub>2</sub> *
Spinell (MgO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	Spinell **
Mullit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · SiO <sub>2</sub> ) <sup>3</sup> .....	Mullit **
Titanoxid (TiO <sub>2</sub> ) .....	TiO <sub>2</sub> *

## Nichtoxidkeramik

### Carbide

Siliciumcarbid (SiC) .....	SiC *
rekristallisiertes Siliciumcarbid .....	RSiC *
nitridgebundenes Siliciumcarbid .....	NSiC *
(drucklos) gesintertes Siliciumcarbid .....	SSiC *
siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid .....	SiSiC *
flüssigphasengesintertes Siliciumcarbid .....	LPSiC *
heiß gepresstes Siliciumcarbid .....	HPSiC *
heiß isostatisch gepresstes Siliciumcarbid .....	HIPSiC *
silikatisch gebundenes Siliciumcarbid .....	SiC *
Borcarbid (B <sub>4</sub> C) .....	BC *

### Nitride und „Nichtoxidische Keramikisolerstoffe“ .....

<b>(C900)</b>	
Aluminiumnitrid (AlN) .....	C 910
Aluminiumnitrid .....	ALN *
Bornitrid (BN) .....	C 920
kubisches Bornitrid .....	CBN *
hexagonales Bornitrid .....	HBN *
Siliciumnitrid, reaktionsgebunden, porös (RBSN) .....	C 930

<sup>2</sup> Bis 1996 genormt.

<sup>3</sup> Als glasphasenfreier bzw. -armer Werkstoff.

## Werkstoffe

Siliciumnitrid, dicht .....	C 935
Siliciumnitrid (SN) .....	SN *
gesintertes Siliciumnitrid .....	SSN *
reaktionsgebundenes Siliciumnitrid .....	RBSN *
heiß gepresstes Siliciumnitrid .....	HPSN *
heiß isostatisch gepresstes Siliciumnitrid .....	HIPSN *
Siliciumaluminiumoxinitrid .....	SIALON *
Titannitrid (TiN) .....	TiN *

Legende: Werkstoff nach DIN EN 60 672 in Form von C ...  
\* Werkstoff nach DIN ENV 14 242 als Abkürzung  
\*\* Werkstoffbezeichnung nach Sprachgebrauch

**Tabelle 1:** Werkstoffe der Technischen Keramik

### 3.4 Beschreibung der Werkstoffe



**Bild 2:** Bauteile aus Technischer Keramik

## 3.4.1 Silikatkeramik

### 3.4.1.1 Technische Porzellane

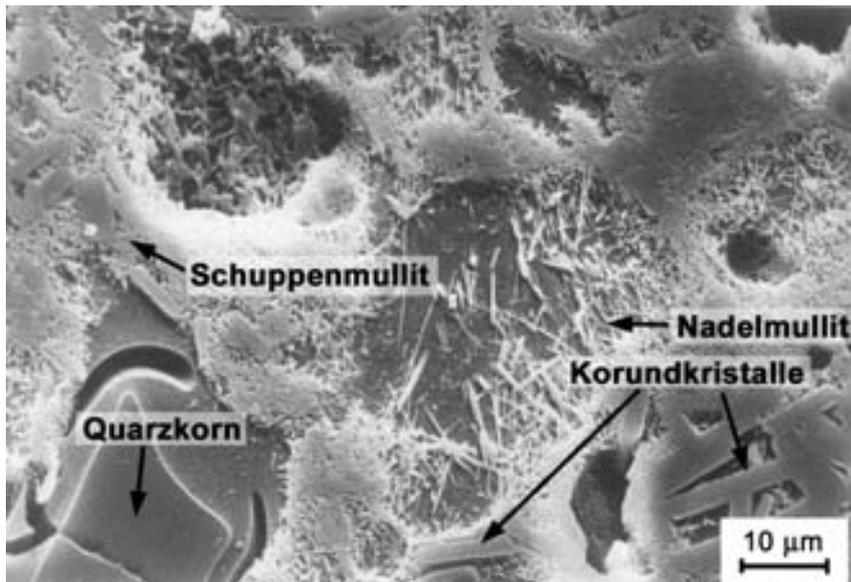
Unter **Technischen Porzellanen** versteht man die Werkstoffe der Gruppe „Alkali-Aluminiumsilikatporzellane“ (C 100), die vielfältige technische Anwendungen in der Elektrotechnik finden.

Als man elektrischen Strom für Technik und Haushalt zu nutzen begann, war Porzellan mit seinen herausragenden Eigenschaften, wie

- hohe mechanische Festigkeit,
- sehr gutes elektrisches Isoliervermögen und
- hervorragende Beständigkeit gegen chemische Angriffe vieler Art verfügbar.

Der Energieverbrauch wuchs schnell, die Anforderungen der Elektrotechnik stiegen und die Eigenschaften des Konstruktionsmaterials Porzellan wurden ständig weiterentwickelt und verbessert. Dies führte zu den heutigen **Tonerdeporzellanen**, die sich vom Quarzporzellan durch deutlich höhere Festigkeit und Zuverlässigkeit selbst bei extremen thermischen Dauerbelastungen (z. B. - 50 °C bis 550 °C) oder plötzlicher Temperaturveränderung (z. B. im Kurzschlussfall) klar abheben. Auch im Langzeitverhalten unter Freiluftbedingungen (Alterung) ist Tonerdeporzellan dem Quarzporzellan überlegen und wird deshalb vor allem bei Freiluftschaltanlagen und Freileitungsisolatoren (z. B. als Langstab-, Bahnisolator und Stützer) von qualitätsbewussten Anwendern eingesetzt.

Neuere Entwicklungen zeigen, dass hydrophobe Oberflächen das elektrische Fremdschichtverhalten verbessern und vereinfachte Bauformen erlauben. Innovativ ist auch der Austausch von Tonerde durch Bauxit. Der neue, wesentlich preiswertere Werkstoff bietet vergleichbare technische Eigenschaften.



**Bild 3:** Gefüge eines Tonerdeporzellans, geschliffen und geätzt, unter dem Rasterelektronenmikroskop

Quarz- und Tonerdeporzellan definieren sich über austauschbare Rohstoffe, also über preiswerteren Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) und vergleichsweise teurere Tonerde ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Das traditionelle **Quarzporzellan** stellt deshalb und auch wegen der preisgünstigen Herstellung eine Alternative für moderate Belastungsfälle dar. Für eine nicht geringe Zahl von Anwendungen ist somit das Quarzporzellan ein Element zur Erhaltung und Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit.

### 3.4.1.2 Steatit

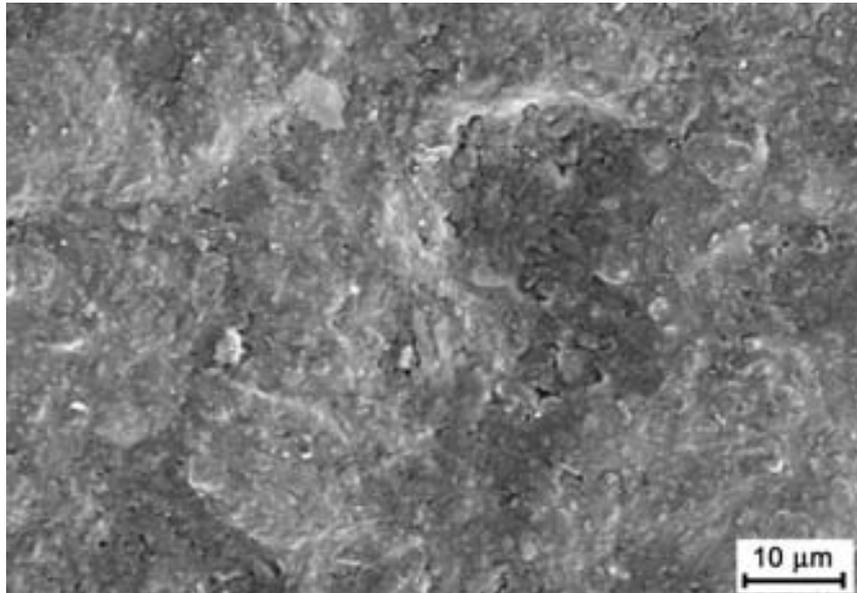
**Steatit** ist ein keramischer Werkstoff auf der Basis natürlicher Rohstoffe und besteht aus der Hauptkomponente Speckstein ( $\text{Mg}(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ), einem natürlichen Magnesiumsilikat und aus Zusätzen von Ton und Feldspat oder Bariumcarbonat. Steatit wird normalerweise dicht gesintert.

Die Art des Flussmittels beeinflusst die elektrischen Eigenschaften des Werkstoffes und führt zur Unterscheidung in Normalsteatit und Sondersteatit, der auch Hochfrequenzsteatit genannt wird.

Sondersteatit wird in der internationalen Normung als Steatit mit niedrigem Verlustfaktor geführt und eignet sich nicht nur für verlustarme Hochfrequenzbauteile, sondern wegen seiner guten Verarbeitbarkeit auch sehr gut zur Herstellung von Bauteilen mit dünnen und gleichmäßigen Wandstärken. Dadurch werden wärmebedingte, gefährliche

mechanische Spannungen beherrschbar.

Das Material eignet sich aufgrund seiner geringen Schwindung besonders für die wirtschaftliche Fertigung von Bauteilen mit engen Toleranzen und wegen der abrasionsärmsten, Werkzeug schonendsten Rohstoffbasis aller keramischen Werkstoffe für das Trockenpressverfahren.



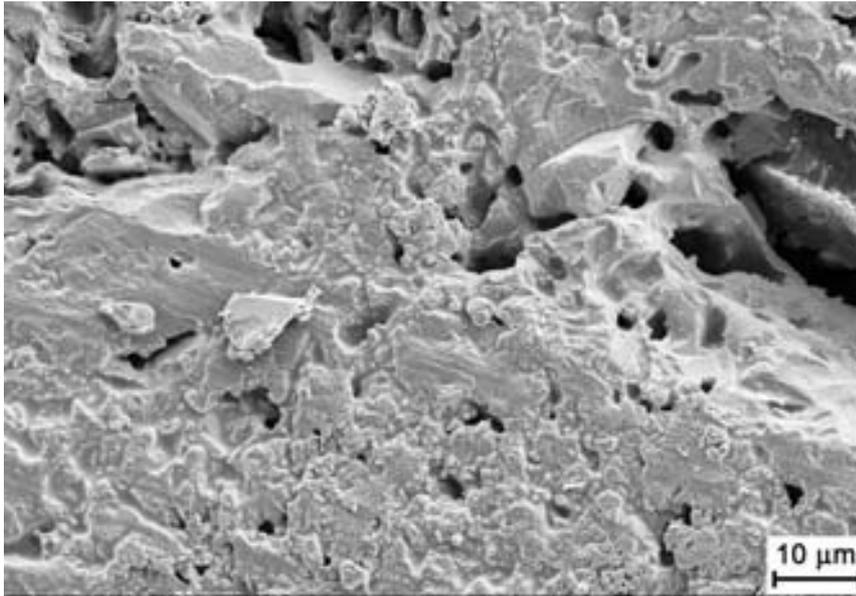
**Bild 4:** Oberfläche von Steatit (C 221) mit Brennhaut

Sondersteatit besitzt beste mechanische und dielektrische Eigenschaften und findet seit mehr als 90 Jahren vielfach Anwendung in der Elektrotechnik, bei elektronischen Bauteilen und in der Wärmetechnik. Typische Anwendungen sind Sockel, Reglergehäuse, Isolierperlen, NH-Sicherungen und Grundplatten.

Für Sonderzwecke, z. B. für Heizpatronen, wird poröser Steatit eingesetzt, der auch noch nach dem Brand mit Werkzeugen gut bearbeitet werden kann und sich durch gute Temperaturwechselbeständigkeit auszeichnet.

### 3.4.1.3 Cordierit

**Cordierit**werkstoffe und darauf basierende Varianten sind Magnesiumaluminiumsilikate, welche direkt beim Sintern von Speckstein oder Talkum mit Zusätzen von Ton, Kaolin, Schamotte, Korund und Mullit entstehen. Die vereinfachte Näherung der Zusammensetzung von reinem keramischen Cordierit ist ca. 14 % MgO, 35 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und 51 % SiO<sub>2</sub>.



**Bild 5:** Gefüge von Cordierit (C 520)

Cordierite haben einen niedrigen Wärmedehnungskoeffizienten. Daraus resultiert die hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit bei guter mechanischer Festigkeit. Unterschieden wird zwischen porösem und dichtem Cordierit. Die porösen Varianten haben gegenüber den dichten zwar niedrige Biegefestigkeiten, aber dafür auch eine noch höhere Temperaturwechselbeständigkeit, da sich mechanische Spannungen in den Poren abbauen können.

Cordierite sind des weiteren bei Temperaturen bis 1.000 °C bzw. 1.200 °C indifferent gegen Heizleiterlegierungen (keine Reaktion zwischen Heizleiter und Keramik).

Cordierite werden deshalb viel in der Elektrowärmetechnik und ganz allgemein in der Wärmetechnik eingesetzt.

Anwendungsbeispiele sind z. B. Isolierkörper für elektrische Durchlauf-erhitzer, Heizleiterrohre, Heizleiterträger in Öfen, Gliederheizkörper, Heizpatronen für LötKolben, Gasbrennereinsätze, Funkenschutzkammern sowie Katalysatorträger im PKW.

Für Sonderzwecke bietet sich ein cordierit- und mullithaltiger Werkstoff mit hohem Aluminiumoxidgehalt (C 530) an, der z. B. höhere Anwendungstemperaturen ermöglicht.

### 3.4.1.4 Mullitkeramik

Im System  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$  können durch Variation der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung die Eigenschaften der Mullitkeramik gezielt eingestellt werden. Reiner Mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) besteht aus 82,7 Masse-%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und 17,3 Masse-%  $\text{SiO}_2$ . Mit konventioneller Sintertechnik lässt sich reines Mullit nicht dicht sintern.

Mullitkeramik besteht aus einem Gefüge, das sich aus den Mineralphasen Mullit, Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Glas ( $\text{SiO}_2$ ) aufbaut.

Sintermullit enthält in der Regel bis zu 10% Glasphase. Die Gesamtporosität liegt aber immer noch bei 10 Vol.-%. Typische Werkstoffe sind M72 und M85. Sie sind in der folgenden Tabelle gegenübergestellt.

Werkstoffe		M 72	M 85
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Masse-%	72	85,5
$\text{SiO}_2$	Masse-%	26,5	13,5
Mullit	Masse-%	90 - 95	50 - 55
Korund	Masse-%	1	45 - 50
Glasphase	Masse-%	5 - 10	0,5
Dichte	$\text{g/cm}^3$	2,85	3,2
Porosität	Vol.-%	9	10

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung und Mineralphasen

Glasphasenarme, poröse Mullitkeramiken besitzen eine relativ hohe Festigkeit, vergleichsweise geringe Wärmedehnung und dadurch hohe Temperaturwechselbeständigkeit. Die Hochtemperatur-Kriechbeständigkeit ist der von reinen Aluminiumoxidkeramik überlegen.

Einsatzgebiete sind Brennhilfsmittel für Temperaturen bis  $1.700\text{ °C}$  – auch in oxidierender Atmosphäre – und Tragrollen in Hochtemperaturöfen. Wegen ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit und hohen Korrosionsbeständigkeit wird poröser Mullit auch in der Feuerfestindustrie eingesetzt.

Steigert man den Glasphasenanteil ( $> 10\%$ ) lässt sich die Porosität deutlich reduzieren. Dicht gesinterte Mullitkeramik verknüpft hohe Festigkeit mit guter Temperaturwechselbeständigkeit und anwendungsgerechter Kriechfestigkeit. Eine wichtige Anwendung stellt z. B. das Thermolement-Schutzrohr dar.

### 3.4.2 Oxidkeramik

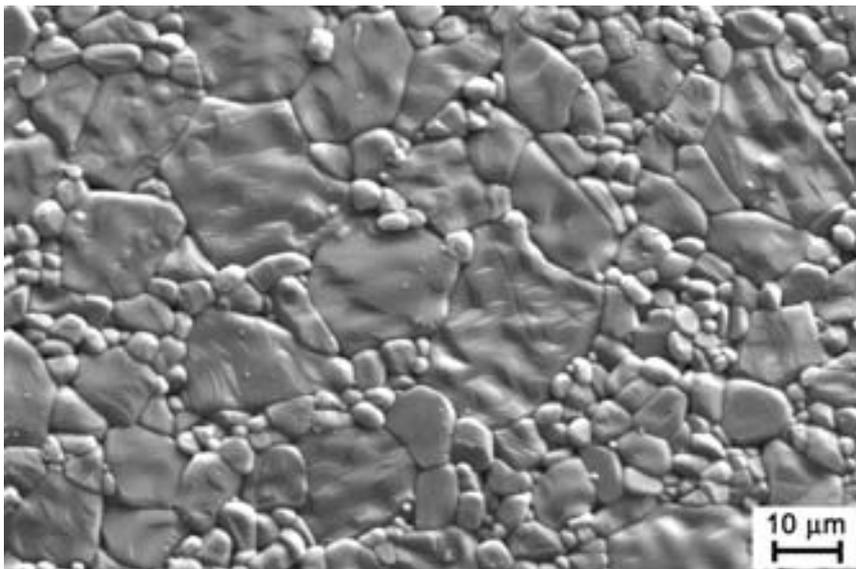
#### 3.4.2.1 Aluminiumoxid

Das **Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )** ist der technisch wichtigste oxidkeramische Werkstoff mit der breitesten Anwendung. Dicht gesintertes Aluminiumoxid zeichnet sich durch

- hohe Festigkeit und Härte,
- Temperaturstabilität,
- hohe Verschleißbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen aus.

Im Einsatz haben sich diese synthetisch hergestellten Werkstoffe mit Aluminiumoxidgehalten von mehr als 80 % bis mehr als 99 % bewährt. Die Auswahl des Werkstoffs wird von technischen und wirtschaftlichen Kriterien bestimmt. Ein Werkstoff mit höherem Aluminiumoxidgehalt muss aber nicht zwangsläufig die gestellten anwendungstechnischen Forderungen am besten erfüllen.

Ebenso können sich die mechanischen Eigenschaften von Aluminiumoxiden unterschiedlicher Hersteller bei gleichem Aluminiumoxidgehalt wegen differierender Pulverrezepturen unterscheiden.



**Bild 6:** Oberfläche von Aluminiumoxid, „as fired“



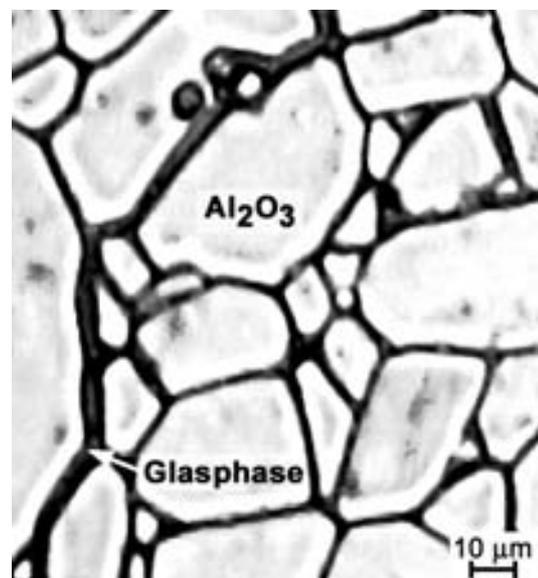
**Bild 7:** Gefüge von Aluminiumoxidkeramik (99,7 %)

Aluminiumoxidwerkstoffe erfüllen alle Bedingungen für Isolierstoffe bei Anwendungen in der Elektrotechnik. Hervorragende Eigenschaftswerte für Biegefestigkeit, Verschleiß- und Hochtemperaturbeständigkeit empfehlen sich für mechanische Anwendungen.

Aluminiumoxidkeramiken können sich im Gefüge (siehe Bild 8 und 9) und damit in ihren Eigenschaften wesentlich unterscheiden.

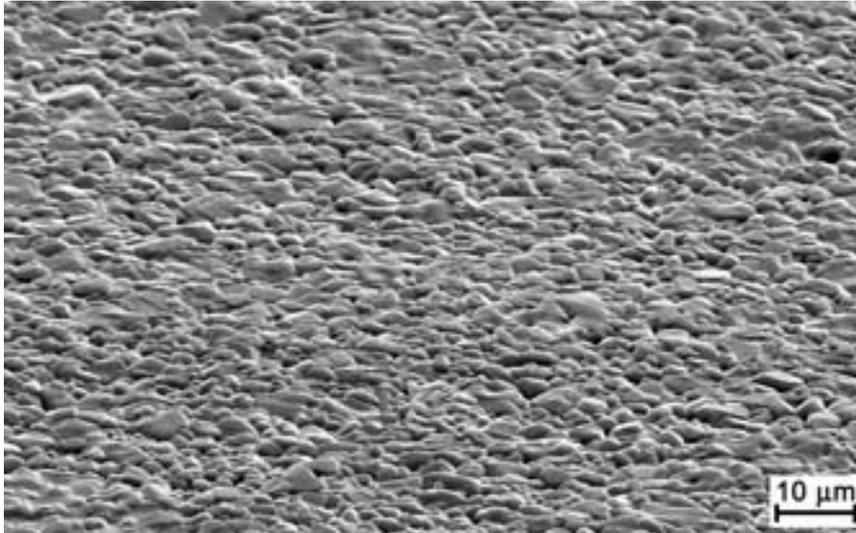


**Bild 8:** Gefüge von mikrokristal-  
linem Aluminiumoxid



**Bild 9:** Gefüge von grobkristallinem  
Aluminiumoxid

Oberflächen mit möglichst hohem Materialanteil<sup>4</sup> sind nicht immer notwendig oder wünschenswert. Bei Fadenführern für die Textilindustrie beispielsweise sollte die Auflagefläche des Fadens klein sein und keine scharfen Kanten aufweisen, während Dichtscheiben einen Materialanteil von ca. 80 % benötigen.



**Bild 10:** „as fired“-Oberfläche eines gezogenen Bauteils aus Aluminiumoxid

Die Aluminiumoxidkeramik findet wegen ihres guten Preis-Leistungs-Verhältnisses und ihrer universellen Eigenschaften unter anderem Anwendung

- in der Sanitärindustrie
  - in der Elektrotechnik
  - in der Elektronik
  - im Maschinen- und Anlagenbau
  - in der chemischen Industrie
- als Dichtelement,  
als Isolierteil,  
als Substrat,  
als Verschleißschutz  
(verschleißfestes Material),  
als Korrosionsschutz  
(korrosionsfestes Material,  
das bis zu hohen Temperaturen gegenüber Dämpfen,  
Schmelzen und Schlacken weitestgehend beständig ist) und  
als Filter,

---

<sup>4</sup> Details zu Traganteil: siehe S. 231 und 236.

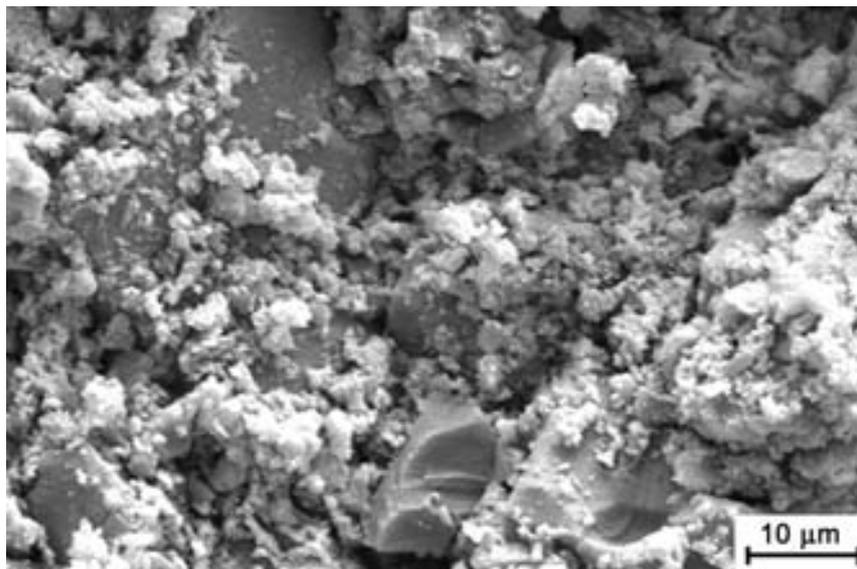
- in der Messtechnik als Schutzrohr für Thermoelemente bei Hochtemperaturmessungen,
- in der Humanmedizin als Implantat und
- in der Hochtemperaturanwendung als Brennerdüse oder als Tragrohr für Heizleiter.

### 3.4.2.2 Magnesiumoxid

**Keramik aus Magnesiumoxid (MgO)** wird meist mit hoher Reinheit im *Einstoffsystem* in poröser oder gasdichter Form hergestellt.

Besondere Kennzeichen sind

- gute elektrische Isolierfähigkeit und
- gute Wärmeleitfähigkeit.



**Bild 11:** Bruchbild von porösem Magnesiumoxid

Aus diesem Werkstoff werden für die Wärmetechnik vorwiegend Röhrenchen mit genau definierter Festigkeit gefertigt. Diese werden über Heizleiterdrähte gezogen und in Metallrohre eingeführt. Durch nachträgliches Hämmern, Walzen oder Ziehen erfolgt eine Querschnittsverkleinerung des Werkstücks. Dadurch wird das Isoliermaterial zerdrückt, und es passt sich der Form an, in die das Gesamtrohr gebracht werden soll. Diese Fertigungstechnik ermöglicht die Herstellung von

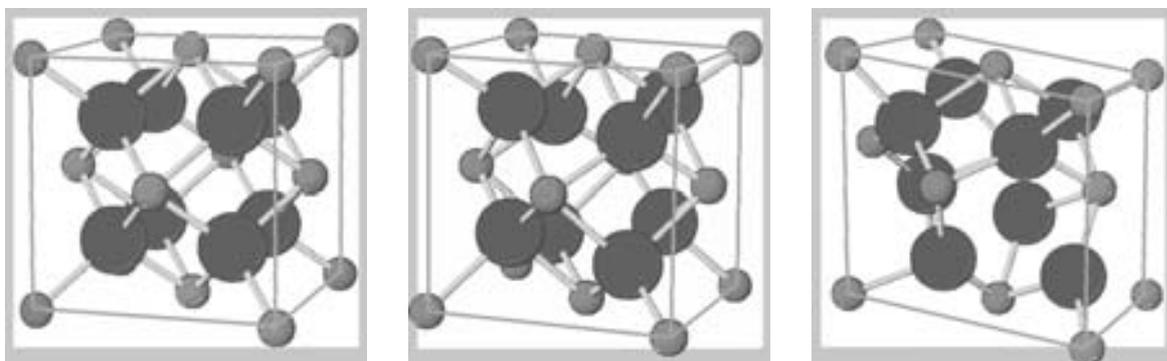
gebogenen Rohrheizkörpern, z. B. für Tauchsieder und Heizpatronen sowie Thermoelemente.

### 3.4.2.3 Zirkoniumoxid

**Zirkoniumoxid ( $ZrO_2$ )**, umgangssprachlich Zirkonoxid, hat in den letzten Jahren zunehmende Bedeutung erlangt wegen

- hoher Bruchzähigkeit,
- Wärmedehnung, ähnlich Gusseisen,
- höchster Biegebruch- und Zugfestigkeit,
- hoher Verschleißbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit,
- niedriger Wärmeleitfähigkeit,
- Sauerstoffionenleitfähigkeit und
- sehr guter tribologischer Eigenschaften (sehr gut für Gleitpaarungen geeignet).

Zirkoniumoxid tritt in monokliner, tetragonaler und kubischer Kristallmodifikation auf. Dicht gesinterte Bauteile lassen sich in der kubischen und/oder tetragonalen Kristallmodifikation herstellen. Um die kubische Kristallmodifikation zu stabilisieren, müssen dem  $ZrO_2$  Stabilisatoren in Form von Magnesiumoxid ( $MgO$ ), Calciumoxid ( $CaO$ ) oder Yttriumoxid ( $Y_2O_3$ ) zugesetzt werden, gegebenenfalls kommen auch Ceroxid ( $CeO_2$ ), Scandiumoxid ( $ScO_3$ ) oder Ytterbiumoxid ( $YbO_3$ ) als Stabilisatoren zum Einsatz.

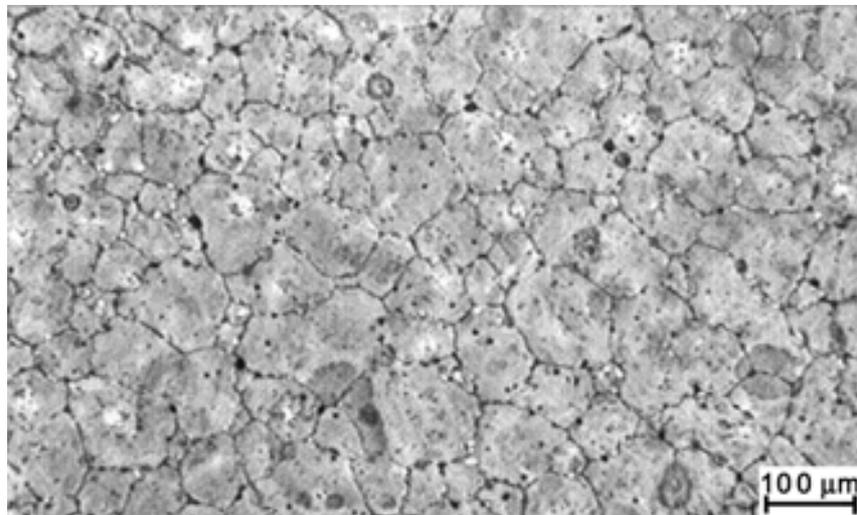


**Bild 12:** Zirkoniumoxid: kubisches, tetragonales und monoklines Kristallgitter  
helle Kugeln = Zr                      dunkle Kugeln = O

Bei **vollstabilisiertem Zirkoniumoxid (FSZ – fully stabilized zirconia)** bleibt durch den Einbau von Fremdoxiden in das Kristallgitter die

kubische Hochtemperaturstruktur auch nach dem Abkühlen erhalten. Der für den technischen Einsatz störende Volumensprung findet beim FSZ nicht statt.

Das **teilstabilisierte Zirkoniumoxid (PSZ – partly stabilized zirconia)** hat große technische Bedeutung. Hier liegt bei Raumtemperatur eine grobe kubische Phase mit tetragonalen Bereichen vor, die durch geeignete Prozessführung oder Anlassprozesse in ihrem Zustand metastabil erhalten wird. Dadurch wurde eine Umwandlung in die monokline Phase verhindert und das Gefüge „vorgespannt“, was mit einer Festigkeits- und Zähigkeitssteigerung verbunden ist.

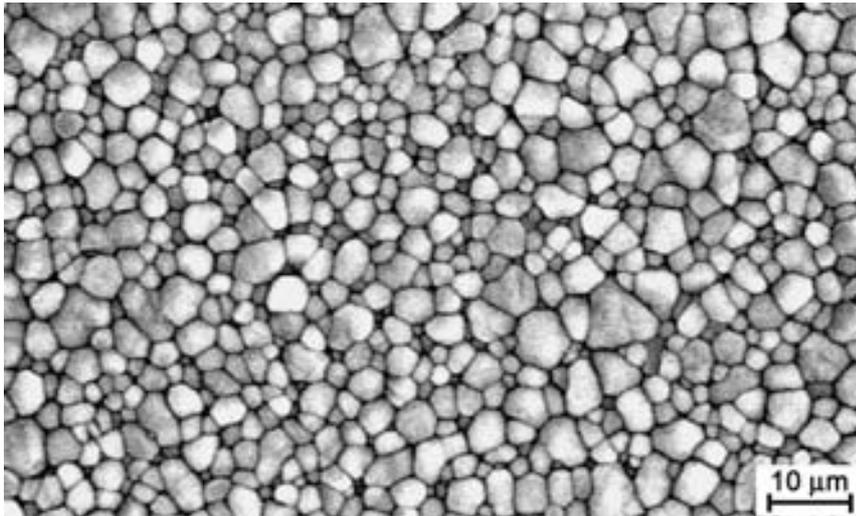


**Bild 13:** Gefüge von teilstabilisiertem Zirkoniumoxid (PSZ)

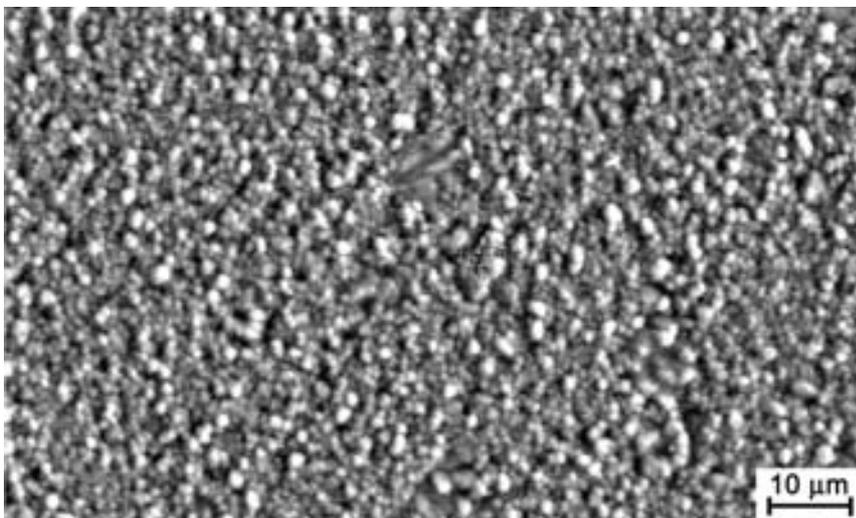
Beim **polykristallinem tetragonalen Zirkoniumoxid (TZP – tetragonal zirconia polycrystal)** wird durch die Verwendung von extrem feinen Ausgangspulvern und Anwendung von niedrigen Sinter-temperaturen ein sehr feinkörniges Gefüge erreicht. Dieses Material zeichnet sich wegen seines extrem feinen Gefüges (Korngröße  $< 100 \mu\text{m}$ ) und der metastabilen tetragonalen Struktur durch außerordentlich hohe mechanische Festigkeit von bis über 1.500 MPa aus.

Die sehr fein ausgebildete tetragonale Kristallphase im PSZ und im TZP zeigt ein einzigartiges Phänomen im Bereich der Hochleistungskeramik: Die Umwandlung der tetragonalen Phase in die monokline kann durch Druck gehemmt werden. Bei Druckentlastung, z. B. durch Rissspitzen oder Zugeigenspannungen, tritt dann die Umwandlung auf. Die druckgesteuerte Volumenzunahme bei der Kristallphasenumwandlung schließt Risse, verlangsamt oder verzweigt sie. Dieses Verhalten wird

als Umwandlungsverstärkung technisch genutzt. Sie führt bei PSZ- und vor allem aber TZP-Keramiken zu extrem hoher Bauteilfestigkeit, welche in Abhängigkeit von der Stabilisierung für maximale Anwendungstemperaturen zwischen 600 °C und 1.100 °C genutzt werden kann. Zirkoniumoxide werden daher bevorzugt für mechanisch hoch belastbare Komponenten eingesetzt.



**Bild 14:** Gefüge von polykristallinem tetragonalen Zirkoniumoxid (TZP)

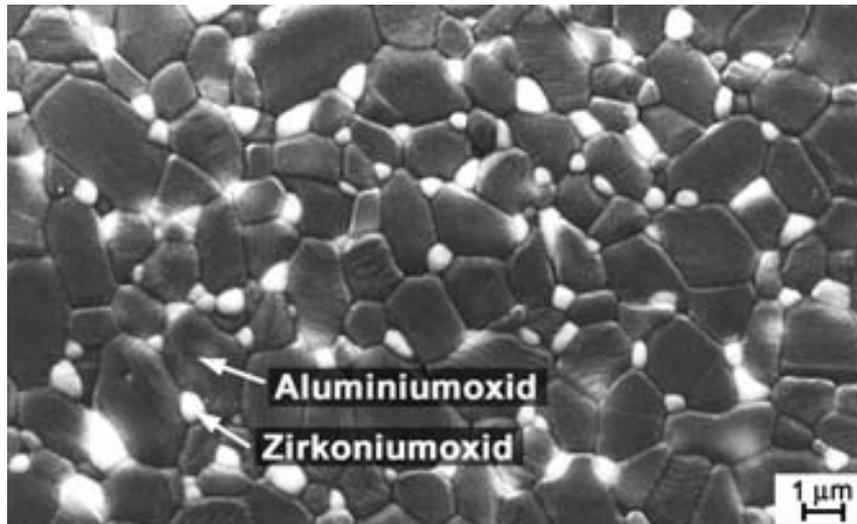


**Bild 15:** Nanogefüge von polykristallinem tetragonalen Zirkoniumoxid (TZP)

Eine weitere werkstoffspezifische Eigenschaft ist seine Sauerstoffionenleitfähigkeit. Dieses Phänomen wird zur Messung von Sauerstoffpartialdrücken genutzt. So besteht z. B. die so genannte Lambdasonde für die Abgasregelung von Benzinmotoren aus Zirkoniumoxid.

### 3.4.2.4 Zirkoniumoxidverstärktes Aluminiumoxid

Dieses wird in der Praxis meist nur ZTA (zirconia toughened alumina) genannt. Seine Eigenschaften hängen stark vom Mischungsverhältnis Aluminiumoxid/Zirkoniumoxid und von der Prozessführung ab.



**Bild 16:** Gefüge von ZTA mit geringem Zirkoniumoxidanteil

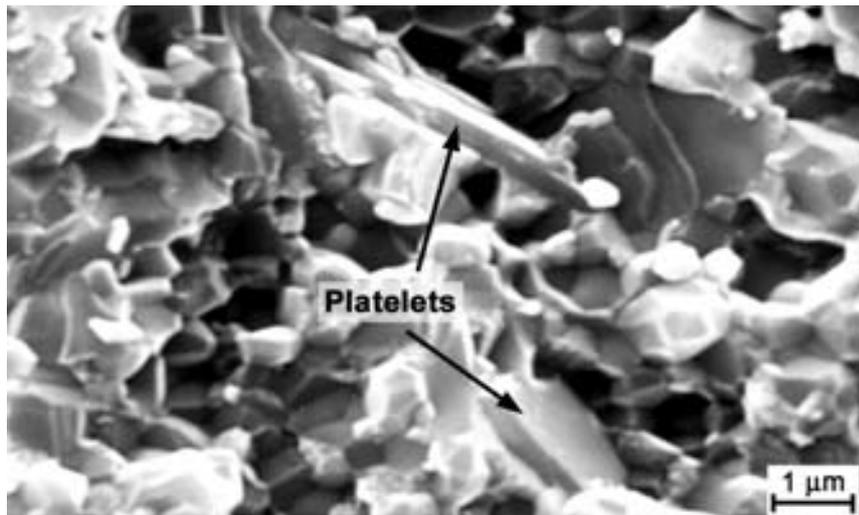
Mit geringen Zirkoniumoxidanteilen bis ca. 10 Vol.-% können gegenüber Aluminiumoxid verbesserte Werte für

- Biegefestigkeit,
- $K_{IC}$ -Faktor,
- Elastizitätsmodul und
- größere Längenausdehnungskoeffizienten erreicht werden.

Bei Werkstoffvarianten mit höheren Konzentrationen von Zirkoniumoxid können durch geeignete Prozessführung im Gefüge Platelets gebildet werden, die zur Steigerung der Werkstoffeigenschaften beitragen (ZPTA-Keramik). Dieses und weitere Maßnahmen zur Eigenschaftsoptimierung machen hervorragende Eigenschaften möglich, die in Bezug auf

- Biegefestigkeit,
- Elastizitätsmodul und
- thermisches Verhalten

denen von Y-TZP (mit Yttriumoxid stabilisiertes tetragonales Zirkoniumoxid) überlegen sind.



**Bild 17:** ZTA mit hohem Zirkoniumoxidanteil als Bruchgefüge zur Darstellung der Platelets

### 3.4.2.5 Aluminiumtitanat

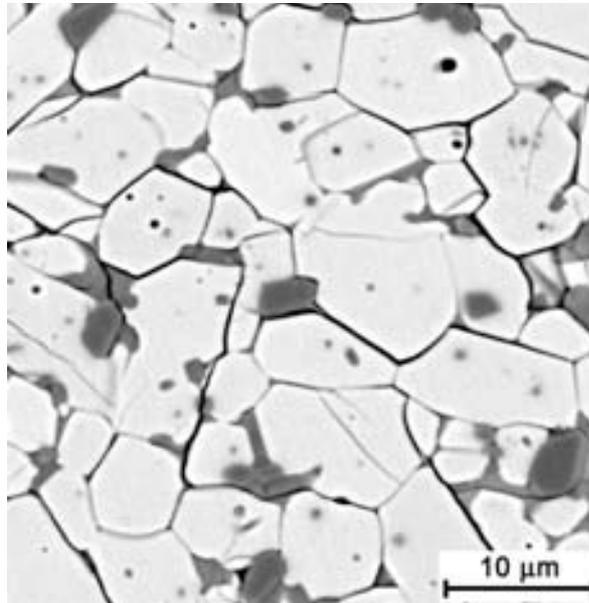
Keramik aus **Aluminiumtitanat (ATI)** ist die stöchiometrische Mischphase ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$ ) von Aluminiumoxid und Titandioxid und zeichnet sich aus durch

- niedrigen E-Modul,
- niedrige Wärmeleitfähigkeit,
- sehr niedrigen Wärmedehnungskoeffizienten und damit verbundene exzellente Temperaturwechselbeständigkeit sowie
- geringe Benetzbarkeit durch NE-Metallschmelzen.

Diese Eigenschaften resultieren aus einer hohen Restporosität sowie Mikrorissen infolge einer sehr ausgeprägten, so genannten Wärmedehnungs-Anisotropie im einzelnen ATI-Kristall. Diese Kristalle weisen in den drei Hauptachsen sehr stark unterschiedliche Wärmedehnungskoeffizienten auf, in zwei Richtungen positive, d. h. Ausdehnung bei Erwärmung, sowie in der dritten Achse eine negative, d.h. Kontraktion. Dies führt bei der Herstellung und hier insbesondere beim Abkühlen zu Spannungen im mikroskopischen Bereich, welche die Ausbildung von Mikrorissen im Gefüge zur Folge haben.

Bezüglich des makroskopischen Ausdehnungsverhaltens weist der Werkstoff wegen der Wärmedehnungsanisotropie der einzelnen Kristalle eine sehr geringe Wärmedehnung auf, da diese im Inneren zunächst

in die gebildeten Mikrorisse hinein erfolgt; d. h., die Risse schließen sich.



**Bild 18:** Gefüge von Aluminiumtitanat

Der makroskopisch geringe Wärmedehnungskoeffizient bewirkt in Kombination mit dem niedrigen E-Modul die herausragende Thermochockbeständigkeit des ATI. Einen für Keramiken ungewöhnlichen Verlauf zeigen auch die Festigkeit und der E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur. Beide Werte nehmen mit steigender Temperatur zu, was wiederum durch das Verschließen der Mikrorisse mit sich erhöhender Temperatur bewirkt wird. Die werkstoffspezifisch geringe mechanische Festigkeit kann durch Verbundkonstruktionen kompensiert werden.

Anwendung findet der Werkstoff beispielsweise bei Portlinern, Zylinder-  
auskleidungen in Fahrzeugmotoren, bei Distanzringen in Katalysatoren,  
bei Brennhilfsmitteln sowie in der Gießereitechnik, insbesondere in  
Aluminiumschmelzbetrieben in Form von Steig- und Dosierrohren,  
Düsen, Tiegeln, Durchflussreglern etc.

### 3.4.2.6 Titandioxide

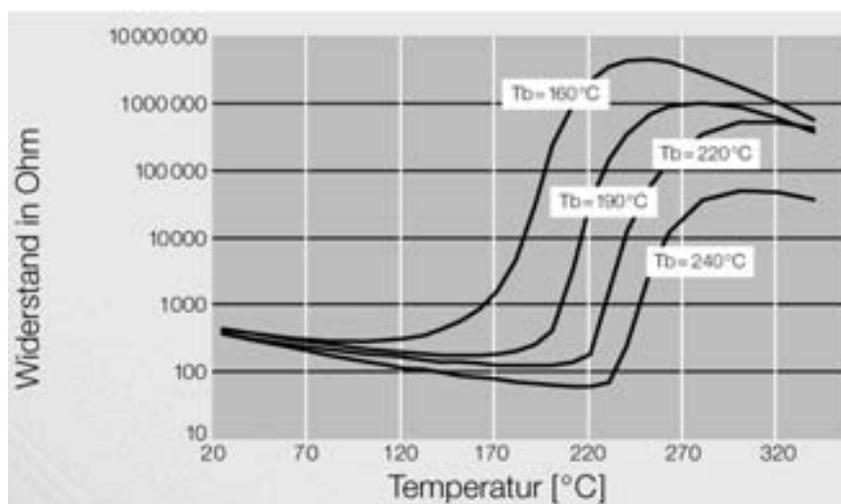
**Titandioxidwerkstoffe** bestehen aus Titandioxid bzw. Titanaten und werden für Kondensatoren in der Hochfrequenztechnik verwendet. Sie zeichnen sich durch in weiten Bereichen einstellbare Permittivitäten und Temperaturkoeffizienten sowie durch kleine Verlustfaktoren aus.

Titandioxid ist andererseits die hauptsächliche Rohstoffkomponente bei den modernen Katalysatoren für die Entstickung der Abluft von Kohlekraftwerken.

### 3.4.2.7 Bariumtitanate

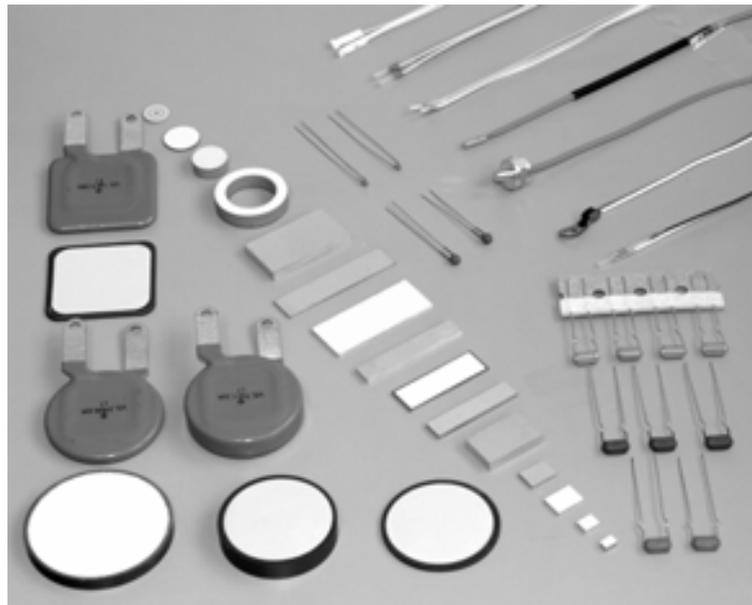
Für **Funktionskeramiken** werden u. a. **Bariumtitanate** verwendet. Diese weisen extrem hohe Permittivität auf, weshalb sie bei Kondensatoren eingesetzt werden. Sie werden auch als piezoelektrische Werkstoffe genutzt.

Aus Bariumcarbonat, Titandioxid und weiteren Rohstoffen zur Dotierung entsteht durch das Sintern bei 1.200 °C bis 1.400 °C polykristallines Bariumtitanat, das Halbleitereigenschaften mit positiven Temperaturkoeffizienten (TK) des ohmschen Widerstands besitzt und den Einsatz als Kaltleiter (PTC) ermöglicht. Gekennzeichnet ist dieser Effekt durch das sprunghafte Ansteigen des elektrischen Widerstands um mehrere Zehnerpotenzen, beginnend bei einer Bezugstemperatur ( $T_b$ ).



**Bild 19:** Widerstandskennlinien von PTC-Keramiken

PTC-Keramiken finden als Temperatursensor in der Mess- und Regelungstechnik und als Grenzwertmelder (Motor- und Maschinenschutz) Verwendung. Weitere Anwendungsgebiete sind der Einsatz als selbst regelnde Heizelemente für Klein- und Netzspannungen, als Schaltverzögerungselemente (Motorstart, Entmagnetisierung) und als Überlastschutz.



**Bild 20:** Bauteile aus PTC-Keramiken

### 3.4.2.8 Bleizirkonattitanat

Die heute wichtigsten *piezoelektrischen keramischen Werkstoffe* basieren auf dem oxidischen Mischkristallsystem Bleizirkonat und Bleititanat, das als **Bleizirkonattitanat (PZT)** bezeichnet wird.

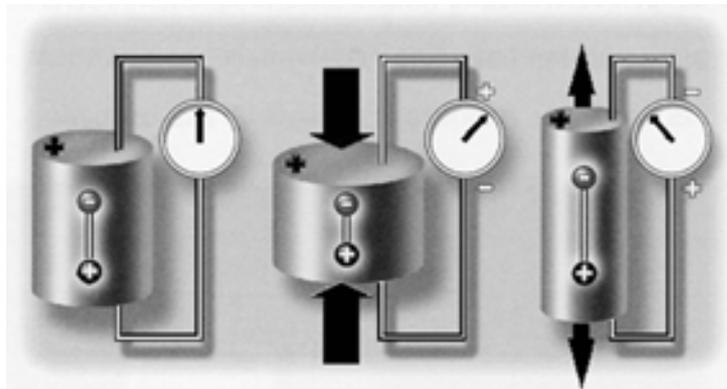
Die spezifischen Eigenschaften dieser Keramiken, wie die hohe Dielektrizitätszahl, hängen vom molaren Verhältnis von Bleizirkonat zu Bleititanat sowie von der Substitution und Dotierung mit zusätzlichen Elementen ab. Daraus ergeben sich vielfältige Modifikationsmöglichkeiten für Werkstoffe mit unterschiedlichsten Spezifikationen.

#### **Der piezoelektrische Effekt**

Der piezoelektrische Effekt verknüpft elektrische und mechanische Größen miteinander.

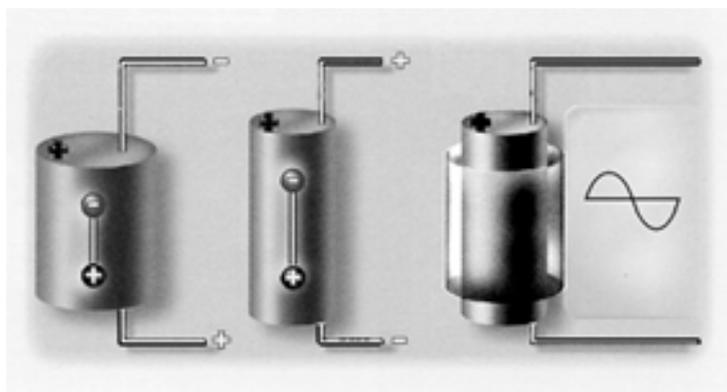
Unter **Piezoelektrizität** versteht man eine lineare elektromechanische Wechselwirkung zwischen den mechanischen und den elektrischen Zuständen eines Kristalls.

Vom **direkten piezoelektrischen Effekt** spricht man, wenn durch eine mechanische Deformation des Kristalls eine hierzu proportionale elektrische Ladung erzeugt wird, die als elektrische Spannung abgegriffen werden kann.



**Bild 21:** Piezoelektrischer Effekt/Einfluss äußerer Kräfte. Je nach Krafrichtung werden elektrische Ladungen entsprechenden Vorzeichens erzeugt.

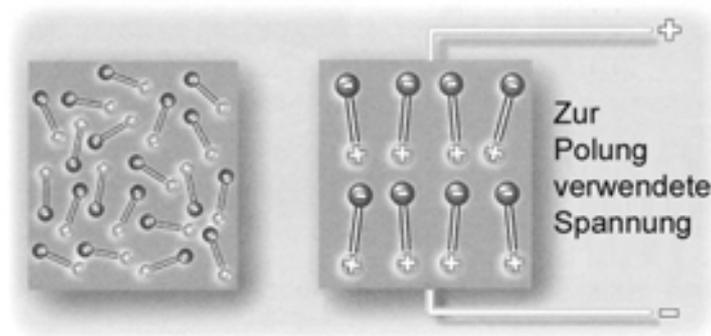
Der **reziproke** oder **inverse piezoelektrische Effekt** zeichnet sich durch eine Deformation aus, welche sich proportional zu einem äußeren elektrischen Feld einstellt, das durch Anlegen einer elektrischen Spannung erzeugt wird.



**Bild 22:** Inverser piezoelektrischer Effekt/Einfluss elektrischer Felder. Der Körper ändert seine Abmessungen mit der Spannungsänderung.

## Grundsätzliches

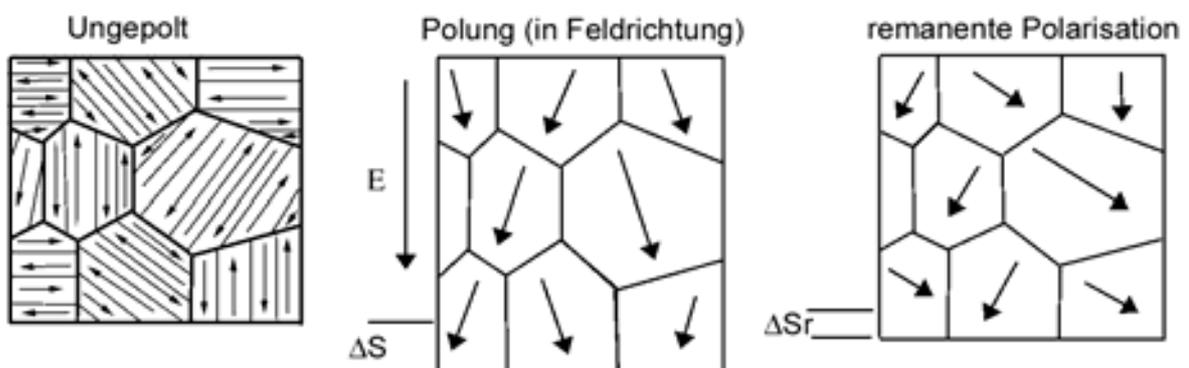
Die Piezoelektrizität ferroelektrischer Materialien ergibt sich aus der Existenz polarer Bereiche (Domänen), die durch die Polung, d. h. durch Anlegen einer elektrischen Spannung, ausgerichtet werden. Die Polung ist mit einer Längenänderung  $\Delta S$  verbunden.



**Bild 23:** Elektrische Dipole der Domänen im piezoelektrischen Werkstoff vor und nach der Polung

**Bleizirkonattitanat**  $Pb(Zr_x Ti_{(1-x)}) O_3$  wird in polykristalliner Form verarbeitet. Die beiden gebräuchlichsten Formgebungen sind das Press- und das Foliengießverfahren. Der Grünling erhält durch den Brand keramische Eigenschaften.

Die Piezokeramik erhält jedoch erst durch einen **Polarisationsprozess** ihre technisch relevanten piezoelektrischen Eigenschaften.



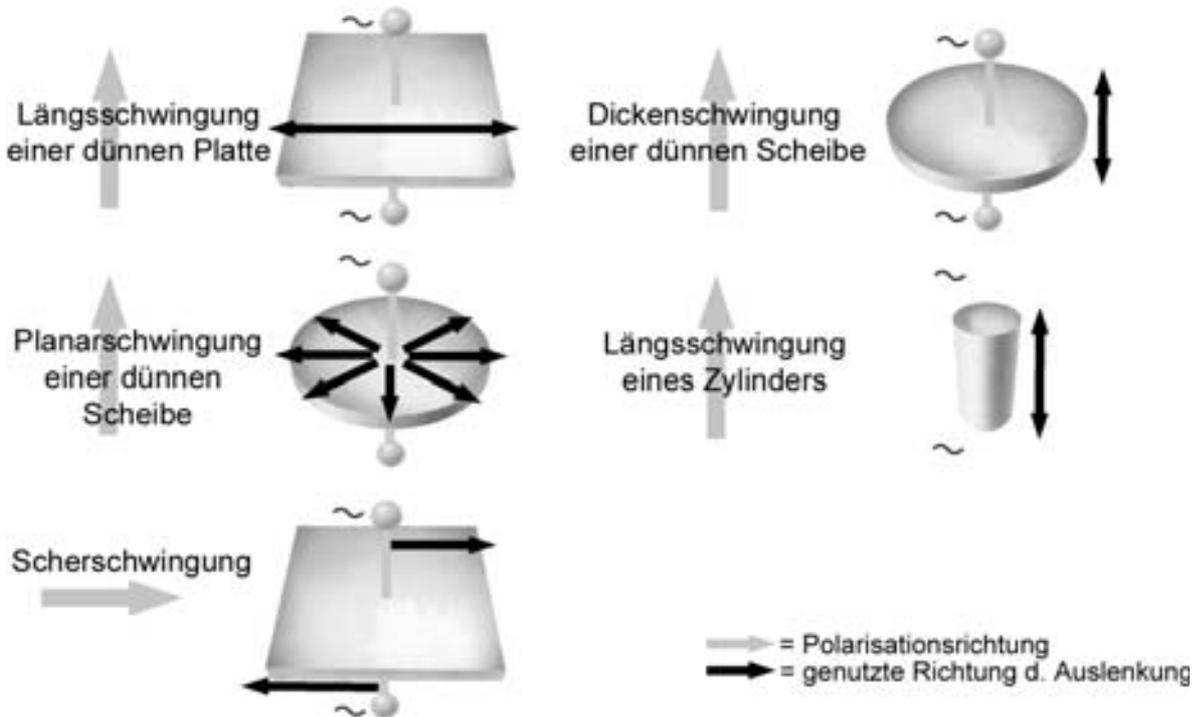
**Bild 24:** Darstellung der Domänen von Bleizirkonattitanat vor, während und nach der Polung

$\Delta S$  = Längenänderung während der Polung

$\Delta S_r$  = remanente Längenänderung nach dem Polungsvorgang

## Resonanzformen piezoelektrischer Bauteile

Aus den Grundschwingarten leiten sich alle Bauteile für die Applikationen als Sensor und Aktor ab.



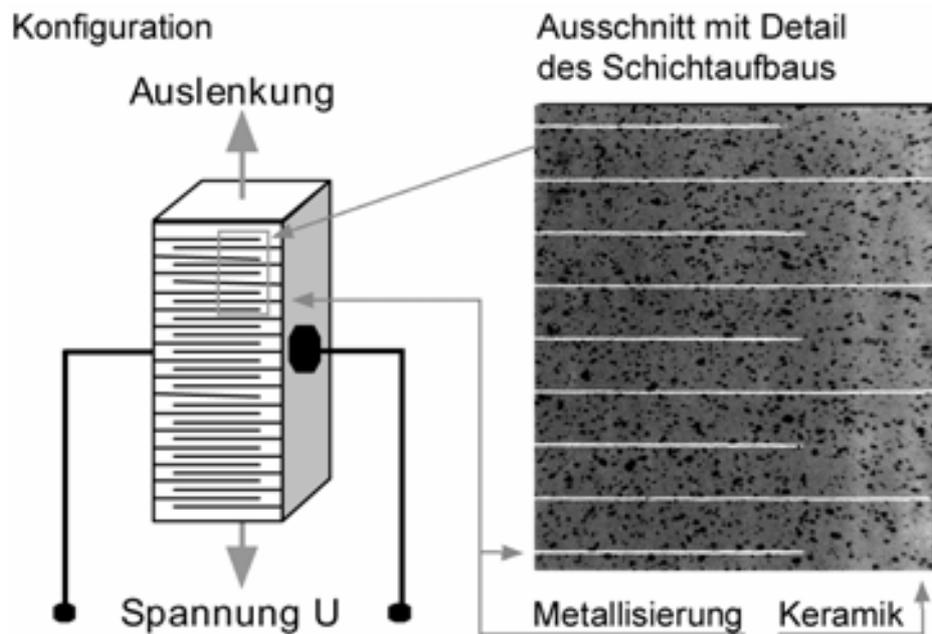
**Bild 25:** Grundschwingarten von piezokeramischen Bauteilen

## Bauformen

Besteht die Piezokeramik aus einer Schicht, spricht man von Single-layer-Technologie. Ist die piezokeramische Komponente aus mehreren aktiven piezokeramischen Schichten aufgebaut, spricht man von Multi-layer-Technologie. Standardmäßig werden daraus heute piezokeramische Scheiben, Platten, Streifen, Ringe, Kalotten, Röhrchen und eine Vielzahl von Sondergeometrien gefertigt.

Aufgrund kompakter Bauweise nehmen piezokeramische Wandler wenig Platz ein und weisen als Aktoren einen geringen Energieverbrauch auf. Für große Hübe werden **Multilayeraktoren** eingesetzt, die auch große Kräfte erzeugen können.

Damit die Außenspannung niedrig bleibt, werden die einzelnen Layer elektrisch parallel geschaltet.



**Bild 26:** Konfiguration und Schnittbild eines piezokeramischen monolithischen Multilayeraktors

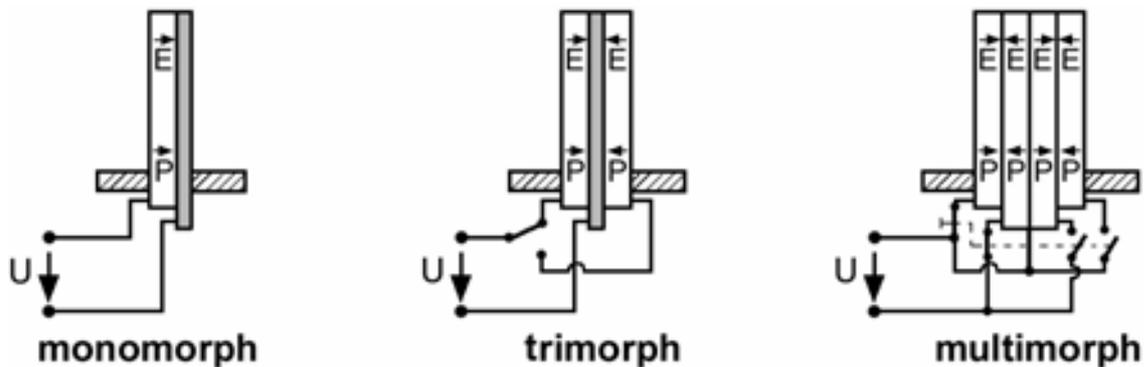
Eine weitere Variante ist der **Biegewandler**. Dieser entsteht, wenn z. B. Piezokeramikelemente mit einem Trägermaterial verklebt werden. Die Piezokeramik reagiert bei elektrischer Ansteuerung mit Längenänderung, und man erhält, ähnlich wie beim Bimetall, eine große Auslenkung des Verbundes in Abhängigkeit von Polung und Spannung mit moderaten Kräften.



**Bild 27:** Das Anlegen der Betriebsspannung verursacht eine Kontraktion der Piezokeramik und damit die Biegung

Aktoren mit einer passiven Lage und einer piezokeramischen Komponente bezeichnet man als Monomorph. Ein bimorpher Biegewandler besteht aus zwei piezokeramischen Keramiken ohne passive Zwischenlage. Ein System aus zwei piezokeramischen Komponenten und einer passiven Zwischenlage bezeichnet man als trimorph. Ein multimorpher Biegewandler besteht aus vielen piezokeramischen

Biege wandler besteht aus vielen piezokeramischen Komponenten und besitzt keine passive Zwischenlage.



**Bild 28:** Aufbauvarianten von piezokeramischen Biege wandlern mit  $P$  = Polarisationsrichtung und  $E$  = Feldrichtung

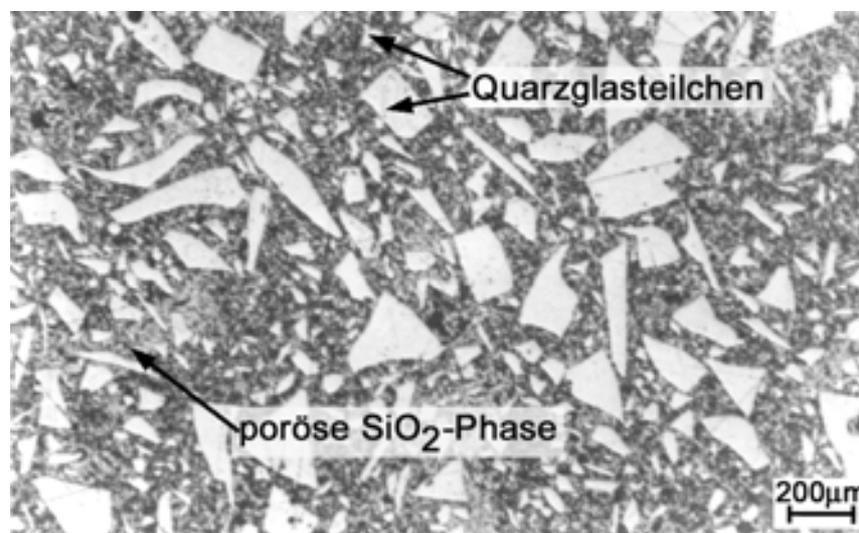
Durch das jeweilige individuelle Design des Biege wandlers können Auslenkungen von einigen Millimetern, Kräfte bis zu einigen Newton und bemerkenswert kurze Stellzeiten erzielt werden. Damit kann der Biege wandler als leistungsfähiges und schnelles Stellelement eingesetzt werden.

Piezokeramik hat sich weite Anwendungsgebiete in der Elektronik, der Fahrzeugindustrie, der Medizintechnik, dem Geräte- und Maschinenbau und bei Konsumeranwendungen erschlossen:

Piezokeramische Bauteile kommen als Wandler in der Telekommunikation, Akustik, Hydroakustik, Materialprüfung, Ultraschallbearbeitung, Flüssigkeitszerstäubung, Durchflussmessung, Füllstandsmessung, Abstandsmessung und in der Medizintechnik zum Einsatz. In Form von Aktoren findet man sie in Mikropumpen, optischen Systemen, in Gasventilen, in der Tiefdrucktechnik, bei Tintenstrahldruckern, in Textilmaschinen und Braillemodulen (Blindenlesegeräten) wieder. Als Sensoren reagieren sie auf Kraft, Druck und Beschleunigung und ermöglichen die Überwachung unterschiedlichster Prozesse.

### 3.4.2.9 Quarzglas

**Siliciumoxidkeramiken ( $\text{SiO}_2$ )** (auch **Quarzglaskeramiken**<sup>5</sup> genannt) werden aus (amorphem) Siliciumdioxidpulver gesintert. Ziel ist es hier, die typischen Eigenschaften des Siliciumdioxids mit einer thermischen Ausdehnung von nahezu „Null“ auf ein keramisches Bauteil zu übertragen und entsprechend zu nutzen. Mit einer angepassten Prozessführung gelingt es, die (amorphe) Siliciumdioxidphase in der gesinterten Keramik vollständig beizubehalten. Es resultiert eine Keramik, die im Vergleich zu hochfesten Oxid- und Nichtoxidkeramiken nur relativ geringe Festigkeit besitzt, dafür aber eine extrem hohe Temperaturwechselbeständigkeit aufweist, was unmittelbar aus der äußerst geringen Wärmedehnung der (amorphen) Siliciumdioxidphase folgt. Die maximale Einsatztemperatur sollte  $1.050\text{ °C}$  nicht überschreiten. Entsprechend sind auch die Anwendungen dieser Keramiken in den Bereichen extremer Temperaturwechsel und thermische Behandlung von Gläsern angesiedelt. Bei Letzterer schließt die hohe Reinheit und Kompatibilität der Siliciumoxidkeramiken mit dem zu verarbeitenden Glas jegliche Verunreinigungen (z. B. Verfärbung) aus.



**Bild 29:** Gefüge von Quarzglas

<sup>5</sup> Die Bezeichnung Quarzglas hat ihren Ursprung in der Quarzglasherstellung. Aufgrund der vielfältigen Verfahren zur Herstellung mehr oder weniger reiner  $\text{SiO}_2$ -Gläser werden diese heute in der Wissenschaft unter dem Oberbegriff Kieselgläser zusammengefasst. Das transparente Kieselglas (Quarzglas) aus den Rohstoffen Quarzsand oder Bergkristall ist praktisch chemisch identisch mit der nicht transparenten Quarzglaskeramik. Der wesentliche Unterschied zwischen Kieselglas und Quarzglas liegt also in der unterschiedlichen Transparenz der beiden Materialien. Aus wissenschaftlicher Sicht ist der Ausdruck Quarzglaskeramik falsch, da diese keinerlei kristalline Modifikation des  $\text{SiO}_2$  enthält, sondern nur Quarzglassteilchen.

### 3.4.3 Nichtoxidkeramik

Analog zu den Oxidkeramiken werden auch die nichtoxidischen Keramiken ausschließlich aus synthetischen Rohstoffen gefertigt. Wenn von **Nichtoxidkeramiken** die Rede ist, dann handelt es sich überwiegend um Carbide, Nitride oder Oxinitride. Die Nichtoxidkeramiken werden durch wirklich außergewöhnliche Eigenschaften gekennzeichnet, was in den folgenden Werkstoffbeschreibungen deutlich werden soll. Verantwortlich für die hervorragenden Eigenschaftskombinationen sind die hohen kovalenten Bindungsanteile der carbidischen und nitridischen Kristallstrukturen. Oxidische Kristallstrukturen weisen dagegen einen vergleichsweise höheren ionischen Bindungsanteil auf. Dies bedeutet aber auch, dass sich der Weg vom synthetischen Rohstoffpulver zum Bauteil aufwändiger gestaltet als bei Oxidkeramiken. Die Rohstoffe müssen z. T. extrem fein gemahlen werden, und der Brennprozess erfordert eine absolut sauerstofffreie Atmosphäre, also Vakuum oder Inertgas im gasdichten Brennraum, und das bei Temperaturen, die bis weit über 2.000 °C gehen können!<sup>6</sup>

#### 3.4.3.1 Carbide

##### 3.4.3.1.1 Siliciumcarbide

Die mit Abstand wichtigsten carbidischen Keramiken sind Werkstoffe auf der Basis von **Siliciumcarbid (SiC)**. Diese werden je nach Anwendungszweck in diversen Varianten hergestellt, sie zeichnen sich aber alle durch die typischen Eigenschaften des Siliciumcarbids aus, wie

- sehr hohe Härte,
- Korrosionsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen,
- hohe Verschleißbeständigkeit,
- hohe Festigkeit auch bei hohen Temperaturen,
- Oxidationsbeständigkeit bis zu sehr hohen Anwendungstemperaturen
- gute Temperaturwechselbeständigkeit,
- geringe Wärmedehnung,

---

<sup>6</sup> Weitere Informationen dazu in Kap. 4, S. 70–76, Vom Formen zum Sintern und in Kap 10, S. 209, Bindungsarten und Festigkeit.

- sehr hohe Wärmeleitfähigkeit,
- gute tribologische Eigenschaften und
- Halbleitereigenschaften.

Die oben genannten, typischen Eigenschaften kommen bei den Werkstoffvarianten unterschiedlich stark zum Tragen. Je nach Herstellungstechnik muss bei Siliciumcarbidkeramiken zwischen *artfremdgebundenen* und *arteigengebundenen* Keramiken unterschieden werden, sowie zwischen offenporöser und dichter Keramik:

#### **offenporöses Siliciumcarbid:**

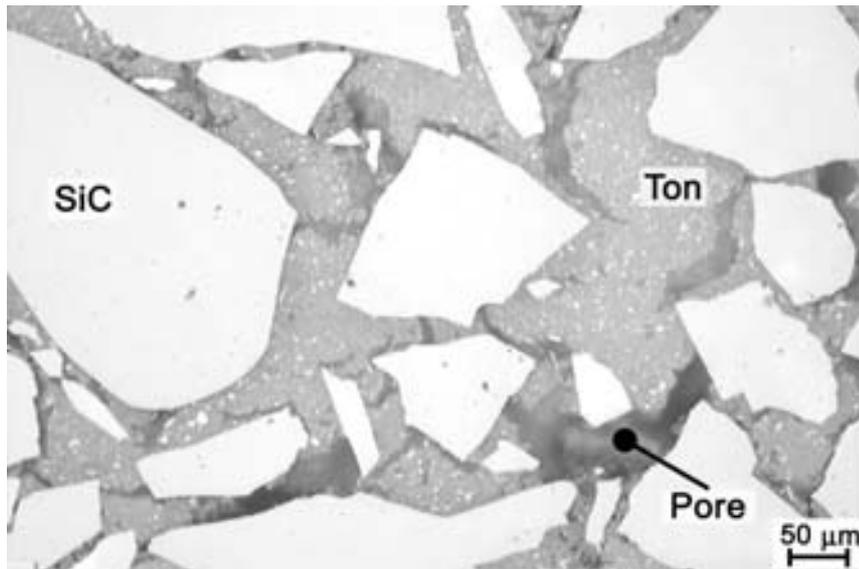
- silikatisch gebundenes Siliciumcarbid
- rekristallisiertes Siliciumcarbid (**RSIC**)
- nitrid- bzw. oxynitridgebundenes Siliciumcarbid (**NSIC**)

#### **dichtes Siliciumcarbid:**

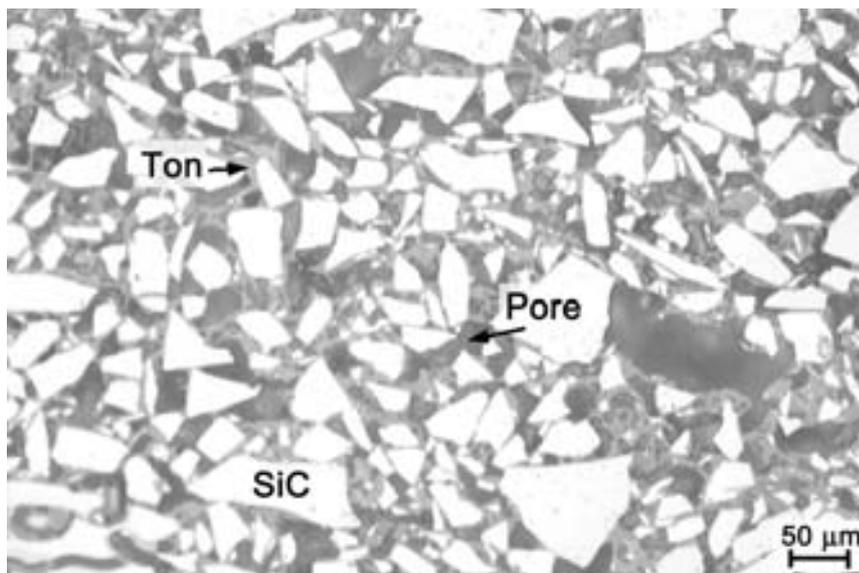
- reaktionsgebundenes siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid (**SISIC**)
- gesintertes Siliciumcarbid (**SSIC**)
- heiß [isostatisch] gepresstes Siliciumcarbid (**HPSIC [HIPSIC]**)
- flüssigphasengesintertes Siliciumcarbid (**LPSIC**)

Art und Anteil der Bindungsarten sind entscheidend für die jeweiligen charakteristischen Eigenschaften der Siliciumcarbidkeramiken.

**Silikatisch gebundenes Siliciumcarbid** wird aus groben und mittelfeinen SiC-Pulvern hergestellt und mit ca. 5 bis 15 % alumosilikatischer Bindematrix unter Luftatmosphäre gebrannt. Die Festigkeiten, Korrosionsbeständigkeiten und vor allem die Hochtemperatureigenschaften werden durch die silikatische Bindematrix bestimmt und liegen daher unterhalb der nichtoxidisch gebundenen SiC-Keramiken. Bei sehr hohen Einsatztemperaturen beginnt die silikatische Bindematrix zu erweichen, der Werkstoff verformt sich unter Last bei hohen Temperaturen. Vorteil ist sein vergleichsweise geringer Herstellungsaufwand. Typische Anwendung findet dieser Werkstoff z. B. als Tellerkapsel beim Porzellanbrand.



**Bild 30:** Gefüge von grobem, silikatisch gebundenem Siliciumcarbid

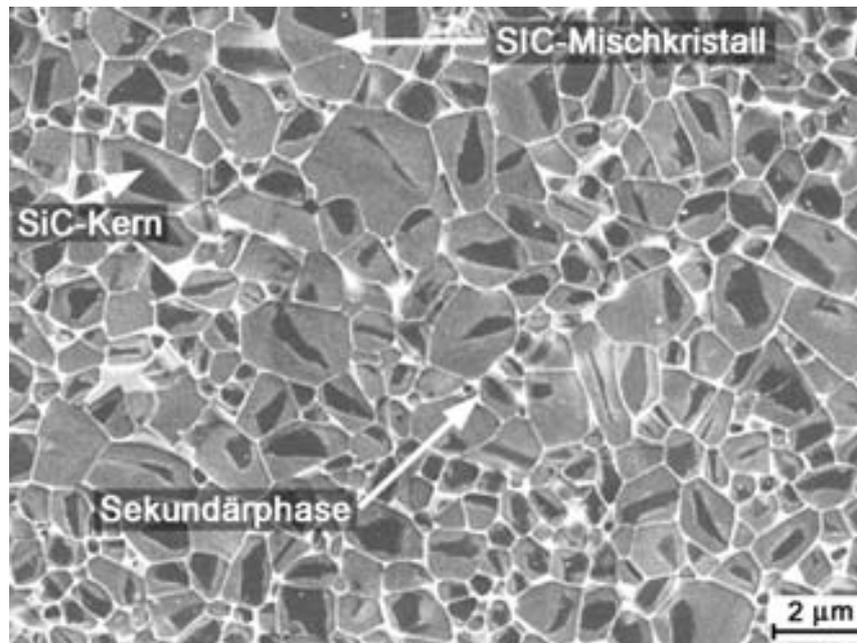


**Bild 31:** Gefüge von feinem, silikatisch gebundenem Siliciumcarbid

**Flüssigphasengesintertes Siliciumcarbid (LPSiC)** ist ein dichter Werkstoff, der SiC und eine oxinitridische SiC-Mischphase sowie eine oxidische Sekundärphase enthält. Der Werkstoff wird aus Siliciumcarbidpulver und variierenden Mischungen von oxidkeramischen Pulvern, oft auf der Basis von Aluminiumoxid, hergestellt. Dabei sind die oxidischen Bestandteile für die gegenüber SSiC etwas höhere Dichte von ca.  $3,24 \text{ g/cm}^3$  verantwortlich. Die Bauteile werden in einem Drucksinterverfahren bei einem Druck von 20–30 MPa und einer Temperatur von über  $2.000 \text{ °C}$  verdichtet.

Der Werkstoff zeichnet sich auch durch seine feinkörnige Matrix mit Korngrößen  $< 2 \mu\text{m}$  und dadurch, dass er praktisch porenfrei ist, durch sehr hohe Festigkeit und hohe Bruchzähigkeit aus.

LPSiC liegt somit von den mechanischen Eigenschaften her gesehen zwischen dem SSiC und dem hochfest-„zähen“  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

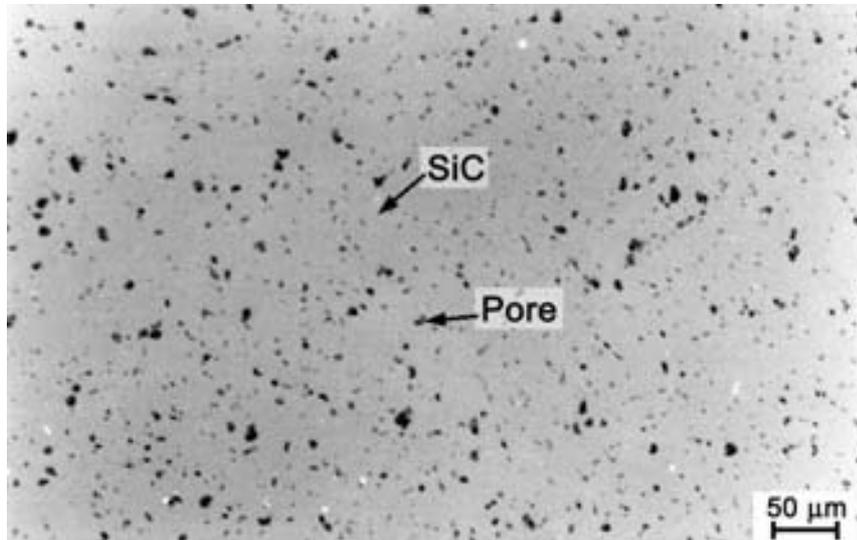


**Bild 32:** Gefüge von flüssigphasengesintertem Siliciumcarbid

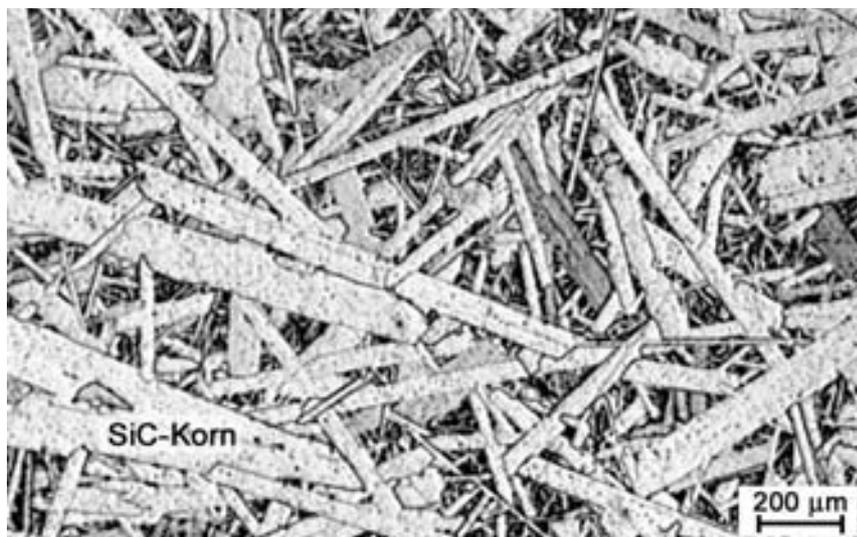
**Drucklos gesintertes Siliciumcarbid (SSiC)** wird aus gemahlenem SiC-Feinstpulver hergestellt, das mit Sinteradditiven versetzt, in den keramiküblichen Formgebungsvarianten verarbeitet und bei 2.000 bis 2.200 °C unter Schutzgas gesintert wird. Neben feinkörnigen Varianten mit Korngrößen  $< 5 \mu\text{m}$  sind auch grobkörnige mit Korngrößen bis 1,5 mm erhältlich. SSiC zeichnet sich durch hohe Festigkeit aus, die bis zu sehr hohen Temperaturen (ca. 1.600 °C) nahezu konstant bleibt und zwar dauerhaft!

Dieser Werkstoff weist eine extrem hohe Korrosionsbeständigkeit gegenüber sauren und basischen Medien auf, denen er ebenfalls bis zu sehr hohen Temperaturen standhalten kann. Grobkörnige Varianten weisen hier Vorteile auf. Diese in der Gruppe der Hochtemperaturkeramiken herausragenden Eigenschaften werden durch eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit, hohe Verschleißbeständigkeit und eine diamantähnliche Härte ergänzt. Das SSiC ist daher für Anwendungen mit extremen Ansprüchen prädestiniert, z. B. für Gleitringdichtungen in Chemiepumpen, Gleitlager, Hochtemperatur-

brennerdüsen oder auch Brennhilfsmittel für sehr hohe Anwendungstemperaturen. Die Verwendung von SSiC mit Grafiteinlagerungen steigert die Leistung von Tribosystemen.



**Bild 33:** Gefüge von SSiC



**Bild 34:** Gefüge von grobkörnigem SSiC

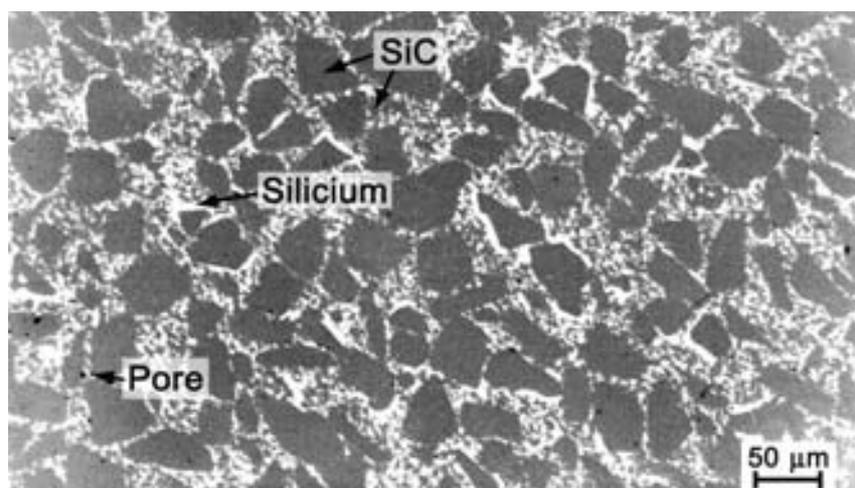
**Heiß gepresstes Siliciumcarbid (HPSiC)** sowie **heiß isostatisch gepresstes Siliciumcarbid (HIPSIC)** weisen gegenüber dem drucklos gesinterten SSiC sogar noch höhere mechanische Kennwerte auf, da die Bauteile durch die zusätzliche Anwendung von mechanischen Pressdrücken bis zu ca. 2.000 bar während des Sintervorgangs nahezu porenfrei werden. Die axiale (HP) bzw. die isostatische (HIP) Press-technik beschränkt die zu fertigenden Bauteile auf relativ einfache bzw. kleine Geometrien und bedeutet zusätzlichen Aufwand gegenüber dem

drucklosen Sintern. HPSiC bzw. HIPSiC finden daher ausschließlich Anwendung in Bereichen extremster Beanspruchung.

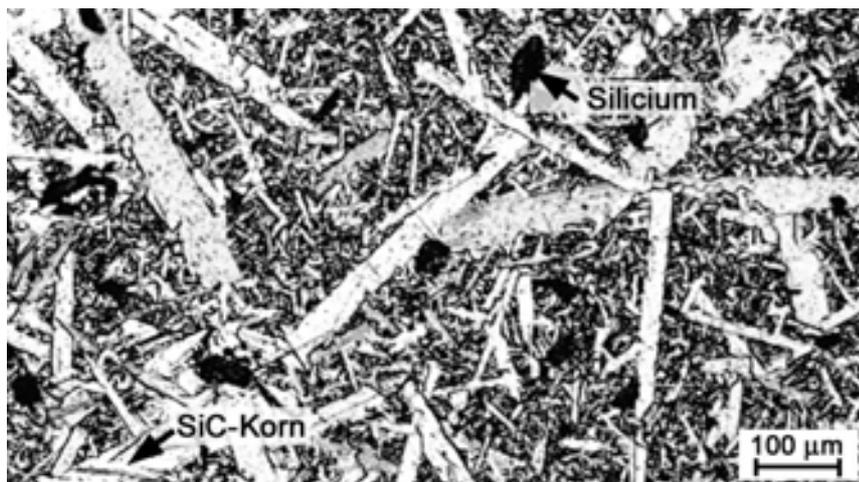
**Reaktionsgebundenes siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid (SISiC)** besteht zu ca. 85 bis 94 % aus SiC und entsprechend aus 15 bis 6 % metallischem Silicium (Si). SISiC besitzt praktisch keine Restporosität.

Dieses wird erreicht, indem ein Formkörper aus Siliciumcarbid und Kohlenstoff mit metallischem Silicium infiltriert wird. Die Reaktion zwischen flüssigem Silicium und dem Kohlenstoff führt zu einer SiC-Bindungsmatrix, der restliche Porenraum wird mit metallischem Silicium aufgefüllt. Vorteil dieser Herstellungstechnik ist, dass im Gegensatz zu den Pulversintertechniken die Bauteile während des Silicierungsprozesses keine Schwindungen erfahren. Daher können außerordentlich große Bauteile mit präzisen Abmessungen hergestellt werden. Der Einsatzbereich des SISiC ist aufgrund des Schmelzpunktes des metallischen Siliciums auf ca. 1.380 °C begrenzt. Bis zu diesem Temperaturbereich weist SISiC hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit, verbunden mit guter Temperaturwechselbeständigkeit und Verschleißbeständigkeit auf. SISiC ist daher prädestiniert als Werkstoff für hoch belastete Brennhilfsmittel (Balken, Rollen, Stützen etc.) und verschiedenste Brennerbauteile für direkte und indirekte Verbrennung (Flammrohre, Rekuperatoren und Strahlrohre).

Es findet aber auch im Maschinenbau bei hoch verschleißfesten und korrosionsbeständigen Bauteilen (Gleitringdichtungen) Anwendung.

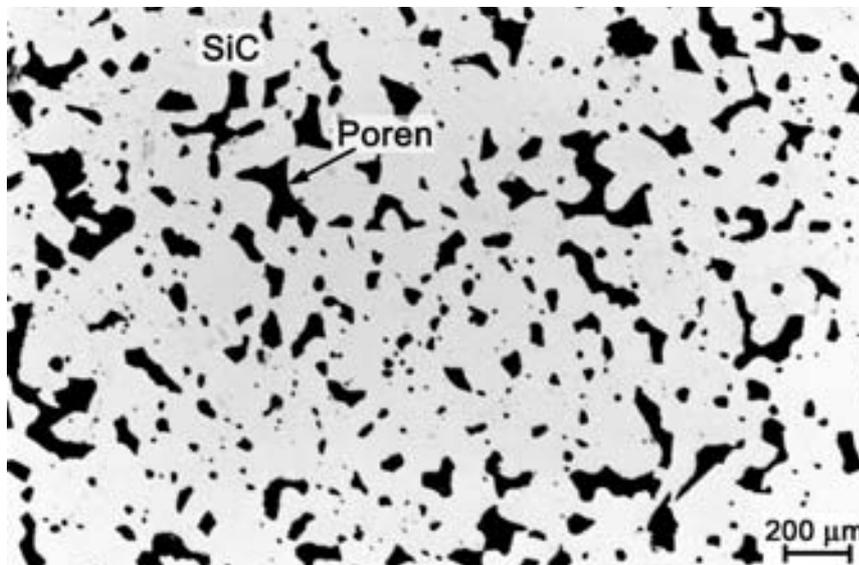


**Bild 35:** Gefüge von SISiC



**Bild 36:** Gefüge von grobkörnigem SiSiC

**Rekristallisiertes Siliciumcarbid (RSiC)** ist ein reiner Siliciumcarbidwerkstoff mit ca. 11 bis 15 % offener Porosität. Diese Keramik wird bei sehr hohen Temperaturen von 2.300 bis 2.500 °C gebrannt, wobei sich ein Gemisch aus feinstem und grobem Pulver schwindungsfrei zu einer kompakten SiC-Matrix umwandelt. Bedingt durch seine offene Porosität hat das RSiC im Vergleich zu den dichten Siliciumcarbidkeramiken geringere Festigkeiten.

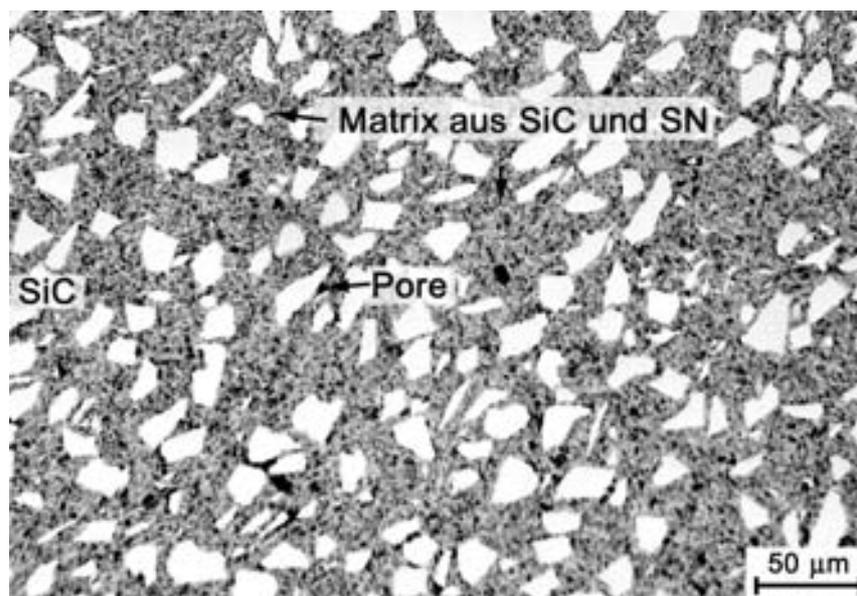


**Bild 37:** Gefüge von RSiC

Das RSiC zeichnet sich infolge seiner Porosität durch eine hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit aus. Die schwindungsfreie Brenntechnik erlaubt analog zum SiSiC die Herstellung großformatiger Bauteile, die vorwiegend als hoch belastbare Brennhilfsmittel (Balken, Rollen, Platten etc.) z. B. beim Porzellanbrand eingesetzt werden.

Bedingt durch seine offene Porosität ist diese Keramik nicht dauerhaft oxidationsbeständig und unterliegt als Brennhilfsmittel oder auch als Heizelement einer gewissen Korrosion. Die maximale Anwendungstemperatur liegt zwischen 1.600 und 1.650 °C.

**Nitridgebundenes Siliciumcarbid (NSIC)** ist ein poröser Werkstoff, mit 10 bis 15 % Porosität und davon 1 bis 5 % offener Porosität, der schwindungsfrei hergestellt wird, indem ein Formkörper aus Siliciumcarbidgranulat und Si-Metallpulver in einer Stickstoffatmosphäre bei ca. 1.400 °C nitridiert. Dabei wandelt sich das anfänglich metallische Silicium zu Siliciumnitrid um und bildet damit eine Bindung zwischen den Siliciumcarbid-Körnern aus. Anschließend wird das Material oberhalb 1.200 °C einer oxidierenden Atmosphäre ausgesetzt. Das bewirkt die Entstehung einer dünnen Oxidationsschutzschicht in Form einer Glasschicht.



**Bild 38:** Gefüge von NSIC

Die Siliciumnitridmatrix bewirkt, dass Werkstücke aus NSIC durch NE-Metallschmelzen schlecht benetzbar sind.

Wegen seiner gegenüber RSIC geringeren Porengröße weist NSIC eine um ca. 100 % höhere Biegebruchfestigkeit sowie eine bessere Oxidationsbeständigkeit auf und unterliegt aufgrund seiner besseren Oberflächenbeständigkeit keiner Verformung über die Einsatzdauer hinweg. Dieser Werkstoff ist hervorragend als hoch belastbares Brennhilfsmittel bis 1.500 °C geeignet.

### 3.4.3.1.2 Borcarbid

**Borcarbidkeramiken ( $B_4C$ )** werden ähnlich wie die Siliciumcarbidkeramiken aus einem Submicron- $B_4C$ -Pulver unter Inertgasatmosphäre bei Temperaturen oberhalb  $2.000\text{ }^\circ\text{C}$  drucklos gesintert (SBC), heiß gepresst (HPBC) oder heißisostatisch verdichtet (HIPBC). Borcarbidkeramiken zeichnen sich durch überragende Härte aus, die nur noch von kubischem Bornitrid und Diamant übertroffen wird. Die mechanischen Eigenschaften der Borcarbidkeramiken entsprechen in etwa denen der Siliciumcarbidkeramik, sie weisen aber vergleichsweise höhere Verschleißbeständigkeit auf. Die Kombination von sehr geringer Dichte ( $2,51\text{ g/cm}^3$ ), hohen mechanischen Festigkeiten und Elastizitätskonstanten machen diese Keramiken insbesondere für den Bereich des ballistischen Schutzes interessant. Im Bereich der Hochtemperaturanwendungen können Borcarbidkeramiken nur bis maximal  $1.000\text{ }^\circ\text{C}$  an  $O_2$ -haltiger Atmosphäre eingesetzt werden, bei höheren Temperaturen würde diese Keramik überproportional schnell oxidieren.

### 3.4.3.2 Nitride

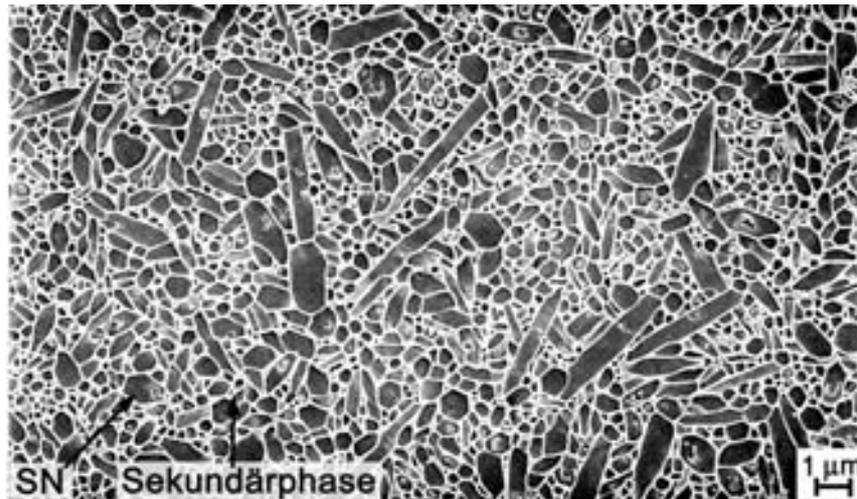
#### 3.4.3.2.1 Siliciumnitride

**Siliciumnitrid ( $Si_3N_4$ )** spielt unter den Nitridkeramiken eine derzeit klar dominierende Rolle und verfügt über eine bislang von anderen Keramiken nicht erreichte Kombination von hervorragenden Werkstoffeigenschaften, die

- hohe Zähigkeit,
- hohe Festigkeit, auch bei hohen Temperaturen,
- ausgezeichnete Temperaturwechselbeständigkeit,
- hervorragende Verschleißbeständigkeit,
- niedrige Wärmedehnung,
- mittlere Wärmeleitfähigkeit und
- gute chemische Beständigkeit umfasst.

Diese Eigenschaftskombination ergibt eine Keramik, die extremsten Einsatzbedingungen gerecht wird. Siliciumnitridkeramik ist somit prädestiniert für Maschinenbauteile mit sehr hohen dynamischen Beanspruchungen und Zuverlässigkeitsanforderungen.

Um dichte Siliciumnitridkeramik herzustellen, wird von einem mit Sinteradditiven ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  etc.) versetzten Submicron- $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Pulver ausgegangen, das nach dem Formgebungsprozess bei Temperaturen zwischen 1.750 bis 1.950 °C gesintert wird. Bedingt durch die Zersetzung von  $\text{Si}_3\text{N}_4$  zu (Si und  $\text{N}_2$ ) ab ca. 1.700 °C bei Normaldruck der Sinteratmosphäre wird während des Sinterns der  $\text{N}_2$ -Druck erhöht, um der Zersetzung entgegenzuwirken.



**Bild 39:** Gefüge von gasdruckgesintertem Siliciumnitrid

Eine relativ kostengünstige Variante ist **niederdruckgesintertes Siliciumnitrid (SSN)**, das mittlere Biegefestigkeiten aufweist und aus dem sich großvolumige Bauteile, z. B. für die Metallurgie herstellen lassen.

Das **gasdruckgesinterte Siliciumnitrid (GPSSN)** wird in einem Gasdrucksinterofen bei einem  $\text{N}_2$ -Überdruck bis zu 100 bar gesintert. Dadurch entsteht ein leistungsfähiger Werkstoff für hohe mechanische Belastungen.

Noch höhere Drücke bis zu 2.000 bar erfahren während des Sinterprozesses das **heiß gepresste** und das **heiß isostatisch gepresste Siliciumnitrid (HPSN bzw. HIPSIN)**. HPSN und HIPSIN zeichnen sich durch noch höhere Festigkeiten im Vergleich zu GPSSN aus, da die hohen mechanischen Drücke im Herstellungsprozess die Restporosität nahezu vollständig beseitigen. Nachteilig sind die eingeschränkten Geometrien beim axial gepressten HPSN (mechanischer Pressstempel) sowie sehr hohe Prozesskosten beim HIPSIN.

## Werkstoffe

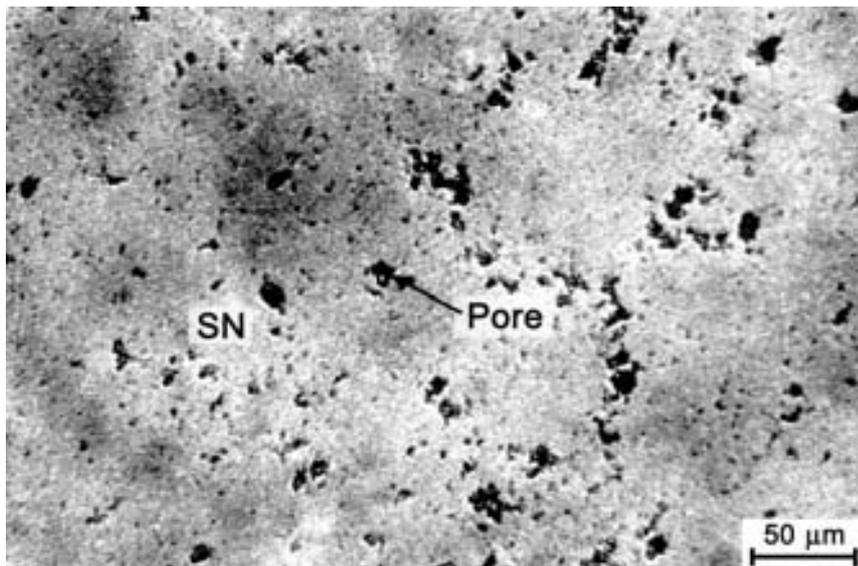
---

Wichtige Einsatzgebiete für Teile aus diesen dichten Siliciumnitridwerkstoffen sind die Metallbearbeitung mit Schneidwerkstoffen (Wendeschneidplatten), die Wälzlagertechnik mit Kugeln, Rollen und Ringen und der Maschinenbau mit hoch belasteten Maschinenelementen. Der Einzug solcher Teile auch in den Bereich der Umformtechnik demonstriert die Leistungsfähigkeit dieser Werkstoffe.

Das **reaktionsgebundene Siliciumnitrid (RBSN)** wird nach einem völlig anderen Herstellungsprozess gefertigt. Hier wird alternativ zum hochpreisigen  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Pulver das vergleichsweise preiswerte Si-Pulver als Rohstoff verwendet, geformt und in  $\text{N}_2$ -Atmosphäre bei Temperaturen von ca.  $1.400\text{ }^\circ\text{C}$  zu  $\text{Si}_3\text{N}_4$  nitridiert, und zwar schwindungsfrei! Die resultierende Keramik weist gute mechanische Kennwerte auf, ist aber durch ihre sehr feine und offene Porosität hochtemperatur-oxidationsempfindlich.

Anwendungsbeispiele für RBSN sind Brennhilfsmittel, Schmelztiegel und Schmelzkokillen, z. B. für die Herstellung von Siliciumbauelementen für die Solartechnik.

Werden dem Si-Pulver zusätzlich Sinteradditive zugegeben, kann das nitridierte  $\text{Si}_3\text{N}_4$  anschließend dicht gesintert werden (gesintertes RBSN = **SRBSN**). Beide Werkstoffvarianten eignen sich allerdings prozessbedingt nur für Bauteile mit Wandstärken von maximal 20 mm.



**Bild 40:** Oberfläche von reaktionsgebundenem Siliciumnitrid

### 3.4.3.2.2 SIALONe

Varianten der Siliciumnitridkeramiken sind die **Siliciumaluminiumoxinitride (SIALON)**. Hier wird der Rohstoffversatz aus Siliciumnitrid u. a. mit dem Metalloxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$  angereichert, um bestimmte Mischkristallformen zu synthetisieren, welche bei geringeren Sintertemperaturen ähnlich gute Eigenschaften wie das Siliciumnitrid erreichen. Über die Art und Menge der Zusätze lassen sich die mechanischen Eigenschaften in weiten Bereichen einstellen. Hervorzuheben ist die vergleichsweise höhere Bruchzähigkeit. Deshalb werden SIALONe vielfach für Schneidwerkzeuge eingesetzt. Ihre geringe Benetzbarkeit durch Aluminium- oder Buntmetallschmelzen haben SIALONe zum Standardwerkstoff bei Thermoelementschutzrohren in den Schmelzbetrieben werden lassen.

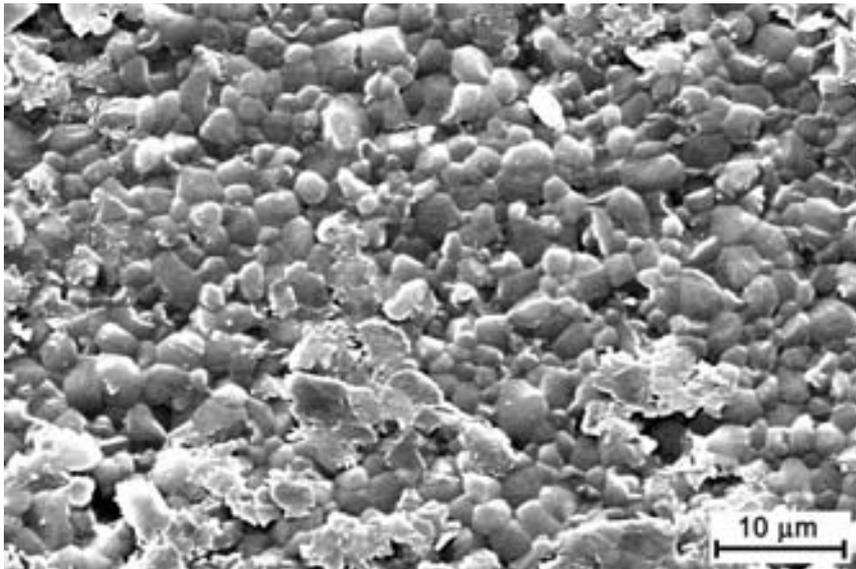
### 3.4.3.2.3 Aluminiumnitrid

**Aluminiumnitrid (AlN)** besticht durch seine hohe Wärmeleitfähigkeit, wobei  $180 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  der Standardwert ist und  $> 220 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  erreicht werden. Kombiniert mit der guten elektrischen Isolierfähigkeit eignet sich Aluminiumnitrid hervorragend für elektrotechnische Anwendungen. Hinzu kommt, dass sich Aluminiumnitridkeramik mit allen gängigen Verfahren metallisieren lässt und dadurch für Hart- oder Weichlöten vorbereitet werden kann. Da die Temperatúrausdehnung von Aluminiumnitrid mit der von Silicium vergleichbar ist, bleiben bei thermisch belasteten Lötverbindungen mechanische Spannungen zwischen diesen beiden Werkstoffen besonders klein.

Wegen seiner Weiterverarbeitbarkeit mittels Dickschichttechnik und Dünnschichttechnik sowie der möglichen Kupferbeschichtung im DCB-Verfahren (direkt copper bonding) und dem AMB-Verfahren (active metall brazing) für  $> 1 \text{ mm}$  hohe Leiterbahnen ist Aluminiumnitrid z. B. ein idealer Werkstoff für die Telekommunikationstechnik.

Aus Aluminiumnitridkeramik werden Substrate für Halbleiterbauelemente sowie für Leistungselektronikbausteine, Gehäuse oder Kühlkörper gefertigt.

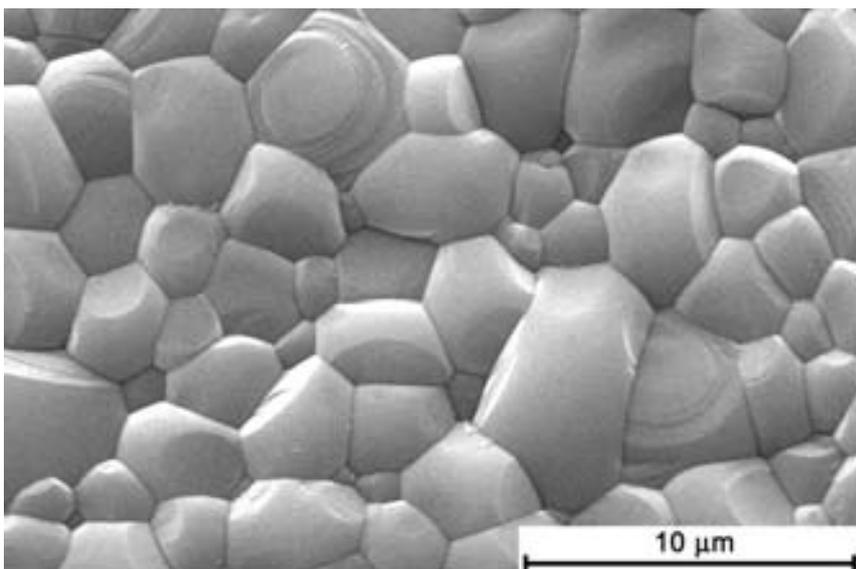
Hohe Resistenz gegen Gase, wie sie bei der Verarbeitung von Silicium-Wafern verwendet werden, sorgt für eine weite Verbreitung von Aluminiumnitridkeramik auch auf diesem Sektor.



**Bild 41:** Oberfläche von Aluminiumnitrid

Aluminiumnitridkeramik ist dann für eine Anwendung besonders geeignet, wenn

- sehr hohe Wärmeleitfähigkeit,
- hohes elektrisches Isolationsvermögen und
- thermische Ausdehnung ähnlich Si ( $< \text{Al}_2\text{O}_3$ ) notwendig sind oder
- inertes Verhalten gegen Schmelzen der III-V-Verbindungen gefordert wird.



**Bild 42:** Bruchfläche von Aluminiumnitrid

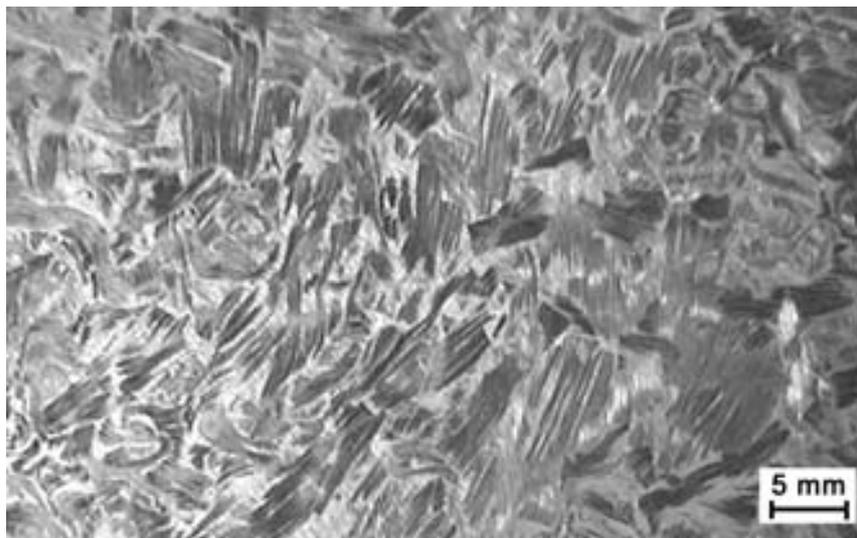
Weniger geeignet ist Aluminiumnitridkeramik für Anwendungen bei Temperaturen über 1.000 °C in wasser- oder sauerstoffhaltiger Umgebung oder unter mechanischer Belastung mit gleichzeitiger Benetzung durch Wasser.

## 3.4.4 Sonderwerkstoffe

### 3.4.4.1 Faserkeramik-Verbundwerkstoffe

Gegenüber monolithischer Keramik zeichnen sich Faserkeramik-Verbundwerkstoffe durch ihr quasiduktiles und damit gewissermaßen metalltypisches Bruchverhalten aus. Durch ihre Eigenschaft, auf entsprechende Belastung mit Verformung zu reagieren statt mit sprödem Bruch, lassen sich höhere Schadenstoleranzen erzielen. Spannungsspitzen führen nicht zum katastrophalen Versagen des Bauteils, da sie durch verschiedene Energie absorbierende Mechanismen wie Mikrorisse oder Delaminationen lokal abgebaut werden.

Bedingt durch die zurzeit noch hohen Herstellungskosten kommen Faserkeramik-Verbundwerkstoffe bislang nur in besonderen Fällen zum Einsatz, z. B. als Hochleistungsbremsscheibe bei Sportfahrzeugen oder als Sonderbauteil in der Luft- und Raumfahrt.



**Bild 43:** Gefüge eines Faserkeramik-Verbundwerkstoffs

## 3.4.4.2 Metal-Matrix-Composits

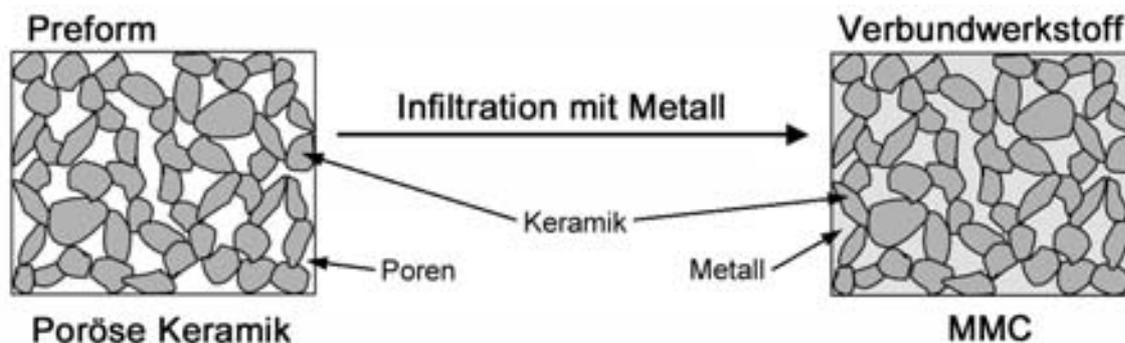
Mit Metal-Matrix-Composits (MMCs) werden Verbundwerkstoffe bezeichnet, deren Gefüge aus einer metallischen Legierung und einer gezielt eingebrachten Verstärkungskomponente besteht.

MMC = Metall + Verstärkung

Die metallischen Legierungen der Matrix können verstärkt werden mit:

- Partikeln (z. B. Aluminiumoxid, Siliciumcarbid, ...)
- Langfasern (z. B. Aluminiumoxid, Siliciumoxid, ...)
- Kurzfasern (z. B. Aluminiumoxid, Siliciumoxid, Kohlenstoff, ...)
- Whiskern<sup>7</sup> (z. B. Aluminiumoxid, Siliciumcarbid, ...)
- Mischungen aus Partikeln und Fasern (Hybridverstärkung)

Für die metallische Matrix wird am häufigsten eine Aluminiumlegierung eingesetzt. Vermehrt werden aber auch Magnesium und Kupfer verwendet.

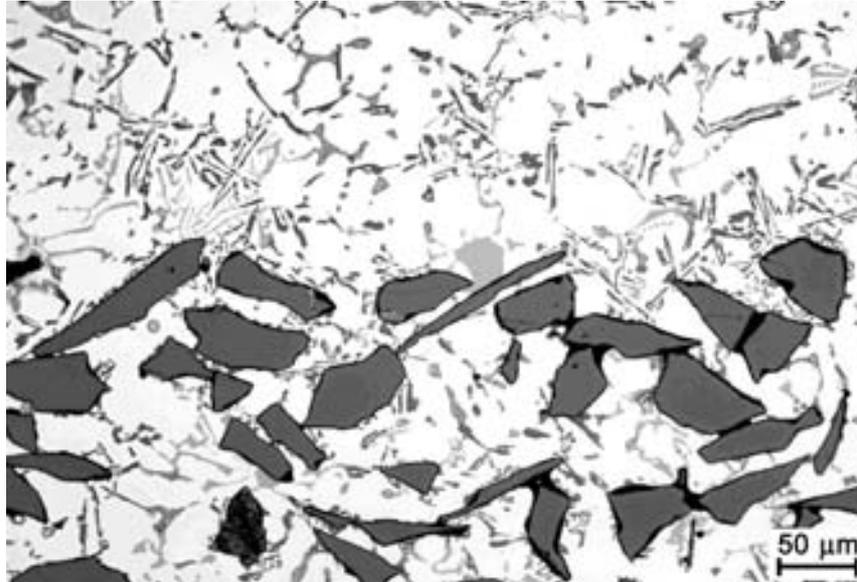


**Bild 44:** Herstellung des Durchdringungsgefüges

Es werden poröse keramische Vorkörper hergestellt, deren offene Porosität gezielt auf Werte zwischen 25 und 75 Volumenprozent eingestellt wird. Anschließend werden die Vorkörper auf über 500 °C erwärmt und dem Infiltrationsprozess zugeführt. Die metallische

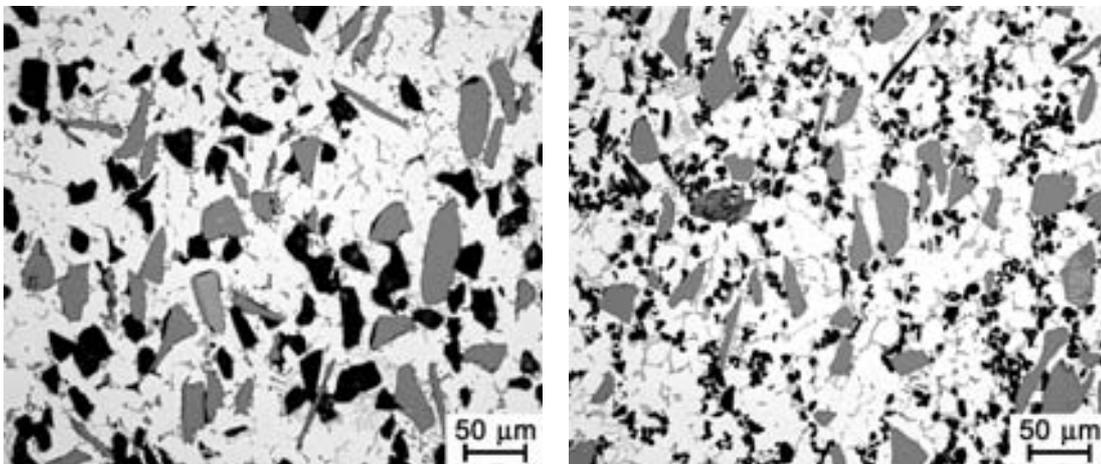
<sup>7</sup> Whisker (engl. für Barthaar): sehr dünne Kristallfaser bzw. nadelartiger Kristall mit hoher Zugfestigkeit

Schmelze durchdringt dabei das poröse keramische Netzwerk, erstarrt und bildet mit der Verstärkungs Komponente zusammen ein Durchdringungsgefüge. Dadurch ist es möglich, Bauteile herzustellen, die nur partiell Verstärkungskomponenten enthalten – genau an den Stellen, wo verbesserte Werkstoffeigenschaften gefordert sind.



**Bild 45:** Gefüge einer partiellen Verstärkung mit Werkstoffübergang

MMC-Werkstoffe werden in der Regel ganz speziell für eine entsprechende Anwendung maßgeschneidert. Dies wird durch die Variation der Partikelart bzw. Partikelkombinationen, des Volumenanteils der Partikel, der Partikelgrößen sowie der Porosität unter Berücksichtigung der Erfordernisse des Infiltrationsverfahrens und Verbundwerkstoffes erreicht. Neben Partikeln können auch Fasern – insbesondere zur Steigerung der Werkstoffzähigkeit – eingelagert werden.



**Bild 46 und 47:** Gefügebeispiele von MMCs

## Werkstoffe

---

Ziele des anwendungstechnischen Gefügedesigns sind zum Beispiel:

- Steigerung der mechanischen Festigkeit,
- Beeinflussung von Reibung und Verschleiß (der Tribologie),
- Beeinflussung der thermischen Dehnung,
- Verbesserung der thermischen Stabilität,
- Beibehalten der Gewichtsreduzierung durch Leichtbau bzw. Erhalt der geringen Dichte,
- gute Verarbeitbarkeit und Bearbeitbarkeit.

Anwendungsmöglichkeiten für MMC-Werkstoffe sind Zylinderlauf-  
flächen bei Kfz-Motoren, Muldenränder bei Motorkolben, Bremsbelag-  
trägerplatten (Gewicht), Lager (Wärmedehnung), Pleuelstangen  
(Gewicht), Bremsscheiben für Motorräder oder die Bahn, Sportartikel,  
wie etwa der Schlagkopf des Golfschlägers, Tennisschläger, Fahrrad-  
rahmen für Mountainbikes sowie Kühlplatten für die Elektronik.

## 4 Vom Pulver zum Bauteil

### 4.1 Herstellung

Die grundsätzlichen Eigenschaften eines keramischen Bauteils werden durch die ausgewählten Rohstoffe und das Herstellungsverfahren beeinflusst (siehe Bild 48).



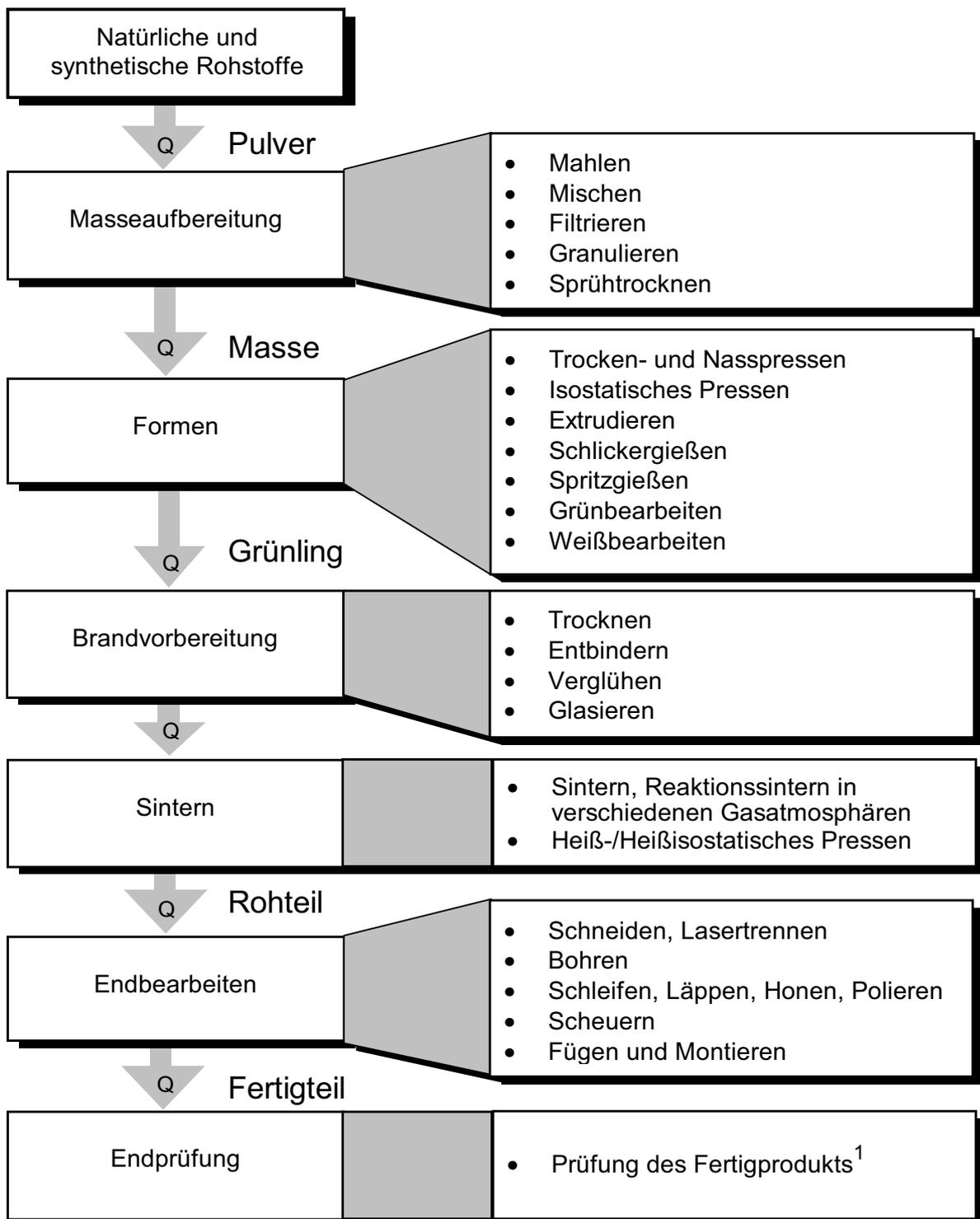
**Bild 48:** Einflüsse auf das Mikrogefüge

Im gesamten, komplexen Herstellungsprozess (siehe Bild 49) bestimmen Pulver, Formgebung und Sinterprozess gemeinsam die Ausbildung der entscheidend wichtigen Mikrogefüge, und erst mit diesen die gewünschten Eigenschaften der Produkte.

Eingeengte Maßtoleranzen von Bauteilen werden durch Hartbearbeitung der gesinterten Keramik ermöglicht.

Gleich bleibende Qualität basiert auf qualifizierten Fertigungsverfahren, deren Vorschriften und Ergebnisse routinemäßig überwacht und protokolliert werden.

## Vom Pulver zum Bauteil



Q = Qualitätssicherungsmaßnahmen  
<sup>1</sup> je nach kundenspezifischer Anforderung

**Bild 49:** Keramischer Herstellungsprozess

## 4.1.1 Rohstoffe und Additive

Grundsätzliche Anforderungen der Produktion und des wirtschaftlichsten Herstellungsprozesses bestimmen die Auswahl der Rohstoffe (nach Art, Reinheit, Korngröße und spezifischer Oberfläche) sowie weiterer Hilfsstoffe.

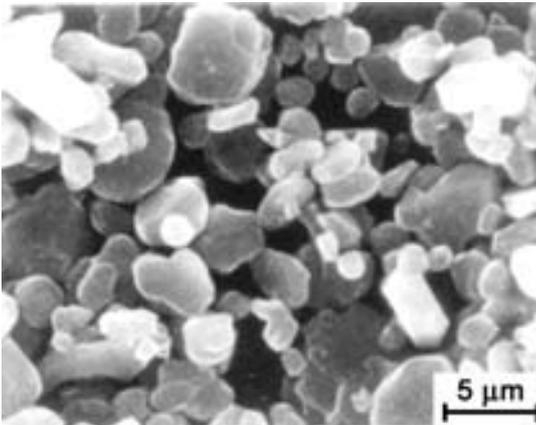
Mit ihrer Feinverteilung und Reinheit kommt den Additiven als

- (anorganischen) Sinterhilfsmitteln

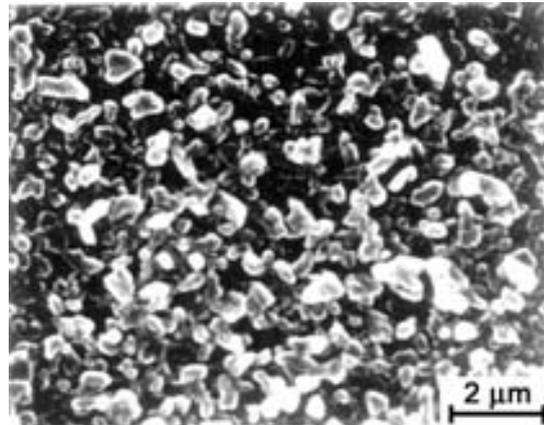
und den (meist organischen) Formgebungshilfsmitteln als

- Verflüssigungsmitteln,
- Plastifizierungsmitteln oder
- Binder

eine ähnliche Bedeutung zu wie den Rohstoffen selbst.



**Bild 50:** Grobes  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pulver



**Bild 51:** Feines  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pulver

## 4.1.2 Masseaufbereitung

Es bieten sich zwei Möglichkeiten an:

- a) Der Keramikhersteller bezieht die Rohstoffe und nimmt alle weiteren Aufbereitungsschritte selbst vor.

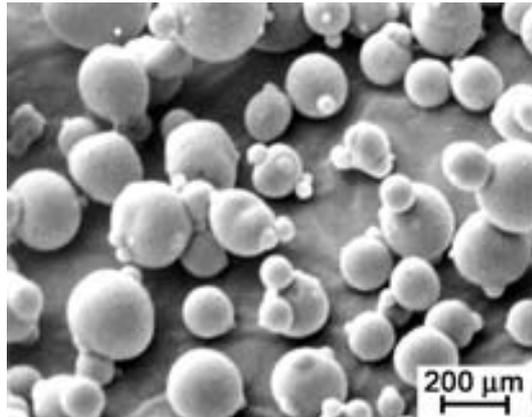
Für die unterschiedlichen Formgebungsverfahren müssen spezifische Arbeitsmassen bereitgestellt werden:

## Vom Pulver zum Bauteil

---

Suspensionen	⇒	für das Gießen,
Granulate	⇒	für das Pressen und
Bildsame Massen	⇒	für das Extrudieren.

- b) Der Keramikhersteller bezieht verarbeitungsfähige Massen und beginnt den keramischen Prozess mit der Formgebung.



**Bild 52:** Aluminiumoxid-Sprühgranulat

### 4.1.3 Urformgebung

Hierbei werden die Pulverteilchen verdichtet und in eine zusammenhängende Form gebracht, die für eine anschließende Handhabung genügend Festigkeit hat. Je nach Notwendigkeit kann dieses geformte, ungebrannte Pulverhaufwerk (Grünling oder Grünkörper) vor dem Brand noch kostengünstig bearbeitet werden, da entsprechende Arbeitsschritte nach dem Brand sehr viel aufwändiger sind. Bei den verschiedenen Verfahren der Formgebung muss darauf geachtet werden, dass es im Grünling nicht zu merklichen Dichtegradienten und Texturen kommt, weil sich diese im Brand u. U. noch verstärken, zu Verformungen führen und innere mechanische Spannungen verursachen können. Die Auswahl des geeigneten Formgebungsverfahrens erfolgt meist nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten (rationelle Fertigung).

Die keramischen Formgebungsverfahren lassen sich in folgende Grundtypen einteilen:

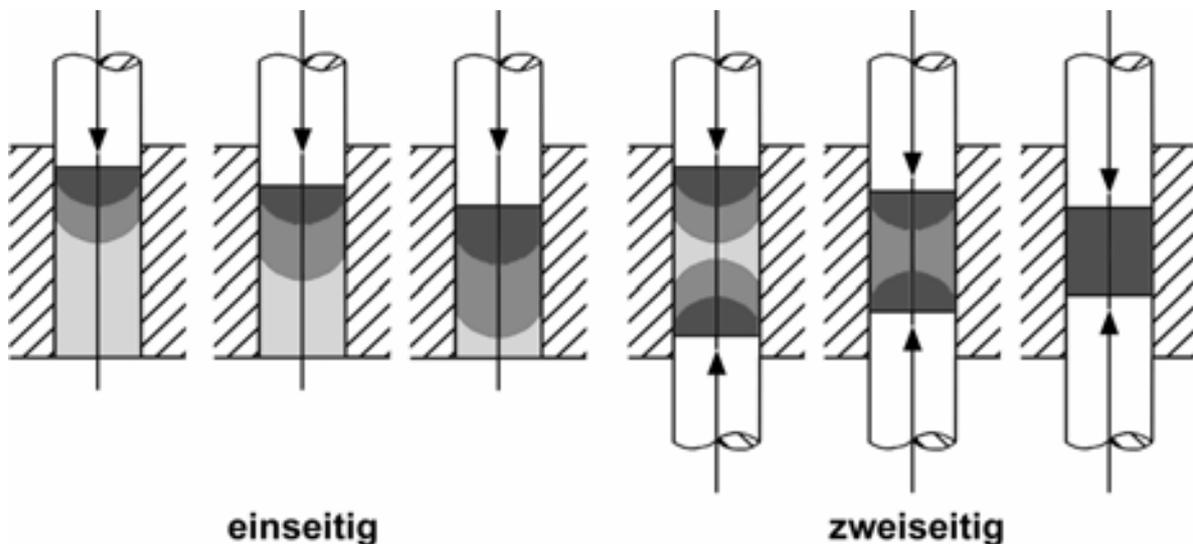
- Pressen (0 – 15 % Feuchte)
- Plastische Formgebung (15 – 25 % Feuchte)
- Gießen (> 25 % Feuchte)

## Trockenpressen

wird zur Herstellung von maßgenauen Massenartikeln eingesetzt. Dabei werden gut rieselfähige Granulate in Stahlmatrizen verdichtet, die entsprechend dem herzustellenden Teil profiliert sind. Die hohen Kosten für das Werkzeug (teilweise aus Hartmetall) sind in der Regel nur bei großen Serien gerechtfertigt.



**Bild 53:** Trockenpressvorgang



**Bild 54:** Uni-axiales Trockenpressen, ein- und zweiseitig, mit Bereichen unterschiedlicher Verdichtung (Graustufen)

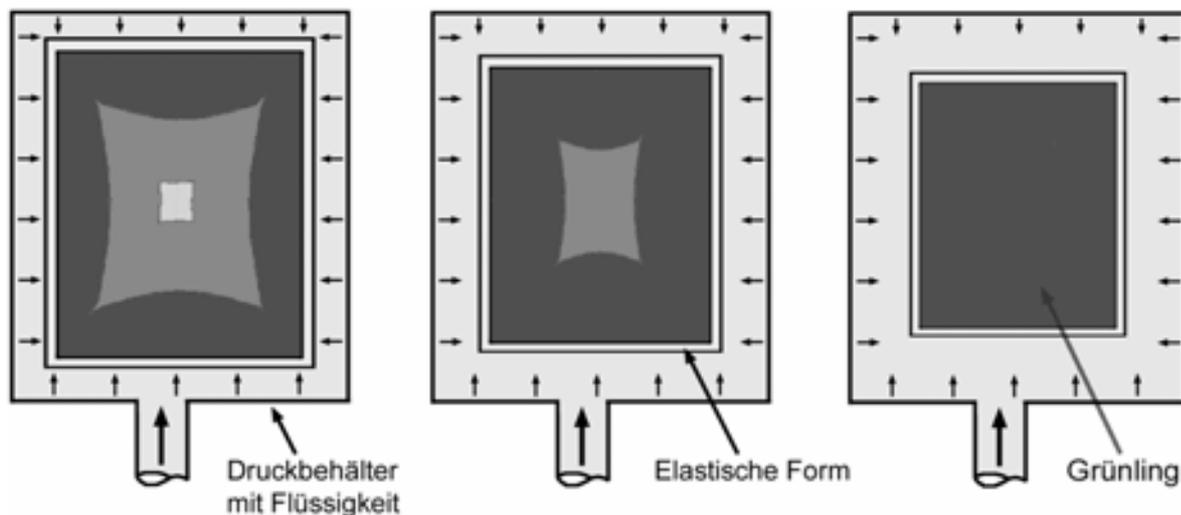
Das Trockenpressen ist bei hohen Stückzahlen das wirtschaftlichste Verfahren und für einfache bis komplizierte Geometrien geeignet. Eingepresste Vertiefungen und Bohrungen sind im Normalfall nur in Pressrichtung vorzusehen.

Je nach Auslegung des Trockenpressautomaten lassen sich Bauteile von Fliesen- bis zu Streichholzkopfgröße realisieren. Kleine Scheiben oder Plättchen können bis zu einer Dicke von ca. 0,8 bis 1 mm

gepresst werden. Für noch dünnere, ebene Bauteile bietet sich eher das Foliengießverfahren an. Feine Stege o. ä. im Bauteil lassen sich noch herstellen, wenn das verwendete Pressgranulat die Hohlräume im Presswerkzeug vernünftig füllen kann bzw. wenn die Werkzeuggestaltung möglich ist.

### **Isostatisches Pressen**

dient zur Herstellung von gleichmäßig verdichteten Rohlingen und Großkörpern, die für eine anschließende spanende Bearbeitung im Grünzustand geeignet sind. Einfache Gummiformen bedingen zunächst einfache Rohformen.



**Bild 55:** Isostatisches Pressen mit Bereichen unterschiedlicher Verdichtung (Graustufen)

Diese Formgebung empfiehlt sich für anspruchsvolle Prototypen- und Kleinserienfertigung, ist aber für bestimmte Produkte auch voll automatisierbar (Zündkerzen, Mahlkugeln, kleinere Kolben, Schweißdüsen).

### **Nasspressen/Feuchtpressen**

ermöglicht komplizierte Bauteilgeometrien, z. B. Gewinde, seitliche Bohrungen, Aussparungen und Hinterschnitte.

Die dazu verwendeten Massen weisen in der Regel Feuchtigkeiten im Bereich 10 bis 15 % auf. Unter der einachsigen Druckbelastung werden diese Massen fließfähig, sodass eine relativ gleichmäßige Verdichtung erreicht werden kann.

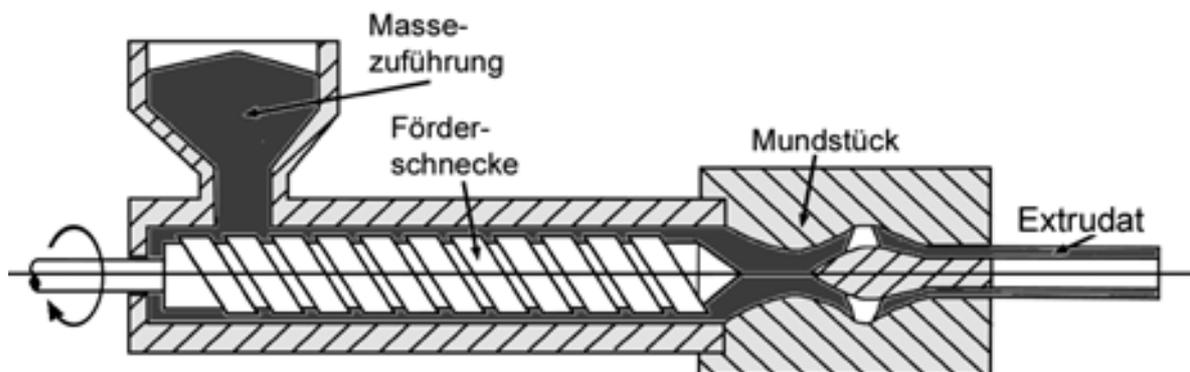
Nachteilig wirkt sich aus, dass Nasspressmassen nur begrenzt Druck-

spannungen aufnehmen können. Dadurch ist auch der Verdichtungsgrad begrenzt, der stark vom Feuchtigkeitsgehalt der Masse abhängt und auch geringer ist als bei Trockenpressteilen. Darüber hinaus ist u. U. eine Trocknung der Pressteile vor dem Sintern erforderlich. Hier-von rühren die Mitteltoleranzen nach DIN 40 680-1.

### **Extrudieren**

erfolgt mittels Kolbenstrang- oder Vakuumschneckenpressen. Die homogenisierte Masse wird dabei durch ein Mundstück gepresst und so zu Endlossträngen geformt. Wichtig ist eine optimale Verdichtung der Masse.

Mit dem Extrudieren lassen sich rotationssymmetrische Teile wie Achsen oder Rohre besonders gut herstellen. Auch komplizierte Profile sind bei entsprechender Mundstücksauslegung machbar. Die herzustellenden Längen der Stränge hängen im Wesentlichen von der Neigung der Arbeitsmasse zum Verzug ab.



**Bild 56:** Extrudieren

### **Spritzgießen**

ist für die Massenfertigung komplizierter Teile grundsätzlich geeignet. Relativ hohe Werkzeugkosten und aufwändige Entbinderung (Entfernung von organischen Additiven) begrenzen noch den Einsatz. Die Fördermenge („Schussgewicht“) beträgt bei den großen Spritzmaschinen typischerweise bis  $\approx 70$  g. Prinzipiell sollten die Wandstärken möglichst gleichmäßig ausgelegt und nach oben auf ca. 12 mm begrenzt werden.

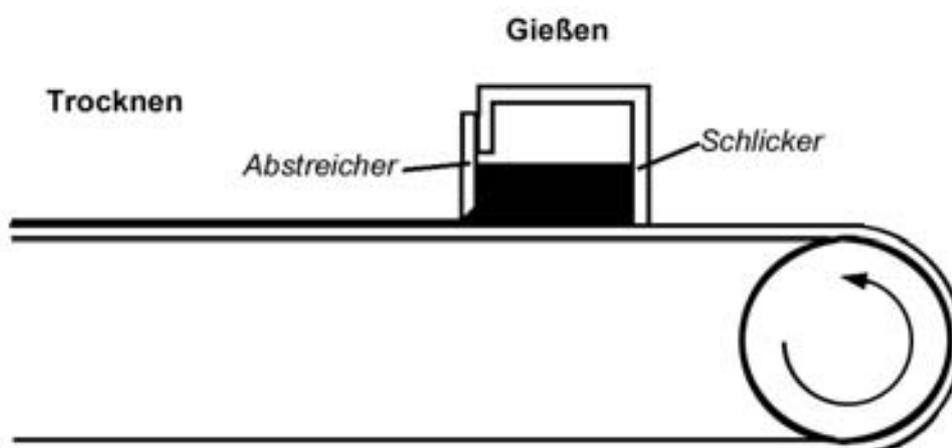
### **Schlickergießen**

ist eine einfache Methode für die Herstellung von Prototypen und geometrisch komplizierten Bauteilen, aber auch von relativ großen Körpern. Dabei können dünne Wände, aber auch Vollkörper realisiert werden. Beim keramischen Schlickerguss wird eine stabile Suspension, der so genannte Schlicker, in eine poröse, saugfähige Gipsform gegossen. Durch den Entzug der Suspensionsflüssigkeit bildet sich an der Formenwand eine Teilchenschicht, die beim Vollguss bis zum fertigen Formkörper anwächst. Beim Hohl-guss wird der überflüssige Schlicker beim Erreichen der gewünschten Wandstärke ausgegossen.

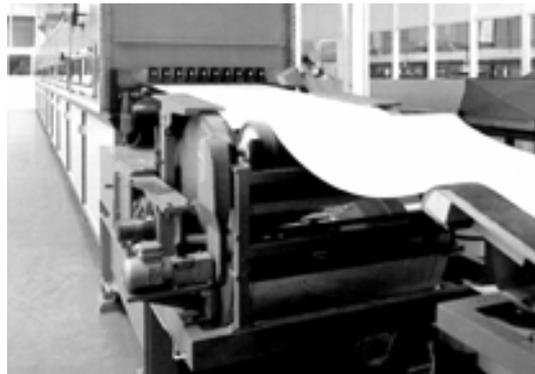
### **Foliengießen**

Hierbei wird ein keramischer Schlicker mit verschiedenen organischen Zusätzen auf ein endloses, über Rollen angetriebenes Stahlband gegossen. Das heißt, der Schlicker läuft kontinuierlich aus einem Vorratsbehälter durch einen einstellbaren Spalt auf das Band. Im Gegenstrom wird zur Trocknung Warmluft über die Folie geblasen, sodass man am Bandende eine, wegen der organischen Zusätze flexible Grünfolie erhält. Diese kann entweder aufgewickelt und für die spätere Weiterverarbeitung eingelagert oder direkt durch Schneiden, Stanzen, Prägen o. ä. weiterverarbeitet werden.

Mittels Foliengießen lassen sich typisch keramische Teile mit einer Dicke im Bereich 0,25 bis 1,0 mm herstellen. Die Formteile eignen sich zur Herstellung von Substraten, Gehäusen, Kondensatoren und Multilayeraktoren.



**Bild 57:** Foliengießen



**Bild 58:** Foliengießmaschine

### **Die Auswahl**

des jeweils anzuwendenden Formgebungsverfahrens wird aus technischer Sicht durch die Geometrie und Größe der Bauteile und die an sie gestellten Anforderungen bestimmt. Stückzahl, Rohstoffeinsatz und Prozesskosten entscheiden über die wirtschaftlichste Lösung.

Die hier zunächst vorgestellten Formgebungsverfahren können noch durch weitere ergänzt werden.

<b>Formgebungsverfahren</b>	
F1 Gießen	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schlickergießen mit Hohl-, Voll- und Sauggießen</li> <li>• Druckgießen</li> <li>• Foliengießen</li> </ul>
F2 Plastisches Formen	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spritzen, Spritzgießen</li> <li>• Extrudieren</li> <li>• Kopierdrehen</li> </ul>
F3 Pressen	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trockenpressen</li> <li>• Isostatisches Pressen</li> <li>• Nasspressen/Feuchtpressen</li> </ul>
F4 Spezielle Verfahren	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Garniertechnik</li> <li>• Laminieren</li> </ul>

**Tabelle 3:** Auswahl keramischer Formgebungsverfahren in der Zusammenstellung

## Vom Pulver zum Bauteil

Formgebungs- verfahren	<i><b>vorteilhaft</b></i> ermöglicht	<i><b>nachteilig</b></i> verbunden mit
Schlickerguss	<ul style="list-style-type: none"> <li>• komplexe Bauteile (dünnwandig, unsymmetrisch)</li> <li>• geringen Materialaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• komplizierter Rheologie</li> <li>• rauen Oberflächen</li> <li>• problematischer Formenherstellung</li> <li>• eingeschränkter Formtoleranz</li> <li>• hoher Maßtoleranz</li> </ul>
Druckguss (im Vergleich zum Schlickerguss)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schnelle Scherbenbildung</li> <li>• sehr kleine Trockenschwindung</li> <li>• gute Maßhaltigkeit</li> <li>• Wegfall der Formenrücktrochnung</li> <li>• geringen Platzbedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aufwändigen Werkzeugen</li> <li>• der Notwendigkeit großer Stückzahlen</li> <li>• problematischen organischen Lösungsmitteln</li> </ul>
Folienguss	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kontinuierliche Produktion</li> <li>• dünne Schichten</li> <li>• gute Maßgenauigkeit</li> <li>• hohe Fertigungskapazität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• beschränkter Bauteilgeometrie</li> <li>• notwendiger Trocknung</li> </ul>
Spritzguss	<ul style="list-style-type: none"> <li>• komplexe Geometrie</li> <li>• kleine Toleranzen</li> <li>• gute Reproduzierbarkeit</li> <li>• hohe Oberflächengüte</li> <li>• Konturschärfe</li> <li>• hohe Stückzahlen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aufwändige Werkzeugen</li> <li>• hohem Werkzeugverschleiß</li> <li>• begrenzter Bauteilgröße</li> <li>• aufwändigem Entbindern/Ausbrennen</li> <li>• auffälligen Dichtegradienten</li> </ul>
Extrudieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kontinuierliche Produktion</li> <li>• hohe Fertigungskapazität</li> <li>• große Bauteillängen</li> <li>• preiswerte Herstellung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• deutlichen Texturen</li> <li>• notwendiger Trocknung</li> </ul>
Trockenpressen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatischen Prozessablauf</li> <li>• gute Reproduzierbarkeit</li> <li>• gute Maßhaltigkeit</li> <li>• eingeschränkte Trocknung</li> <li>• preiswerte große Stückzahlen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschränkungen bei der Bauteilgeometrie</li> <li>• möglichen Dichtegradienten</li> <li>• aufwändigen Formwerkzeugen</li> <li>• aufwändiger Pulveraufbereitung</li> </ul>
Nasspressen/ Feuchtpressen (im Vergleich zum Trockenpressen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• komplizierte Bauteilgeometrien</li> <li>• gleichmäßigere Dichteverteilung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• notwendiger Trocknung</li> <li>• geringerer Verdichtung</li> <li>• größeren Toleranzen</li> </ul>
Isostatisches Pressen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Dichte ohne Textur</li> <li>• keine Dichtegradienten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringen Taktzeiten</li> </ul>

**Tabelle 4:** Vor- und Nachteile üblicher Formgebungsverfahren

## 4.1.4 Vom Formen zum Sintern

Die nach den urformenden Verfahren Gießen, plastisches Formen und Pressen hergestellten Grünlinge enthalten neben den keramischen Pulvermischungen (einschließlich der permanenten Additive) in der Regel noch Feuchte und meist organische Verflüssigungs-, Plastifizierungs- und Bindemittel oder andere Hilfsstoffe.

Alle bei hohen Temperaturen flüchtigen, also verdampfenden oder verbrennenden Anteile müssen vor dem Brennen aus dem keramischen Grünling entfernt werden, was besondere Sorgfalt erfordert, damit sie ihn ohne Schädigung verlassen können.

Abhängig vom Pulver, von der Bauteilform und -größe sowie von der gewählten Urformgebung weist der Grünling mehr oder weniger große Dichtegradienten auf, die sich nach dem Brennen u. U. auch noch im Toleranzspiel der Bauteile bemerkbar machen können.

### Trocknen

In einer geformten feuchten Masse sind alle Teilchen mit einer Wasserhülle umgeben. Mit der Abgabe des Wassers rücken die Teilchen einander näher, und es findet eine Volumenabnahme statt, die so genannte Trockenschwindung.

Die Trockenschwindung nimmt mit der Höhe des Feuchtegehalts zu. Sie ist außerdem von der Korngröße, der Art der Rohstoffe und vom Formgebungsverfahren abhängig.

Z. B. ist durch die plättchenförmige Gestalt der Tonmineralteilchen bei stranggepressten Körpern aus Porzellan die Schwindung längs des Stranges geringer als senkrecht dazu. Solchen Orientierungen oder so genannten Texturen muss man nach Größe und Geometrie der keramischen Bauteile mit vorsichtigem Trocknen Rechnung tragen.

Beim Trocken kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, die den jeweiligen keramischen Bauteilen angepasst sind.

### Ausbrennen

Grünkörper aus natürlichen plastischen Massen haben oft eine ausreichende Rohbruchfestigkeit. Diese kann jedoch mit organischen Additiven verbessert werden. Solche Zusätze sind darüber hinaus bei von Haus aus unplastischen Massen unverzichtbar.

Das Ausbrennen solcher restlichen Plastifizierungs- und Verfestigungsmittel und anderer organischer Additive bedarf eines sorgfältig angepassten Temperatur-Druck-Atmosphären-Zeitprofils, um ein schädigungsfreies und reproduzierbares Austreiben der Hilfsstoffe aus dem feinporösen Formkörper sicher zu ermöglichen.

Eine Variante des Ausbrennens ist das so genannte **Verkoken**, z. B. bei SiC. Dabei werden u. a. Kunststoffanteile in Kohlenstoff umgewandelt, der im Gefüge verbleibt und sich im folgenden Reaktionsbrand mit Hilfe von zugeführten Reaktionsstoffen zu einer keramischen Matrix umsetzt.

Nach dem Trocknen und Ausbrennen bzw. Verkoken wird das Gefüge des Grünlings (Pulverhaufwerk in Bauteilform) lediglich durch Adhäsionskräfte zusammengehalten und bedarf einer besonders sorgfältigen Handhabung während der weiteren Prozessschritte. Aus diesem Grund werden Trocknen und Ausbrennen nach Möglichkeit mit dem keramischen Brand zusammengefasst.

### Verglühen

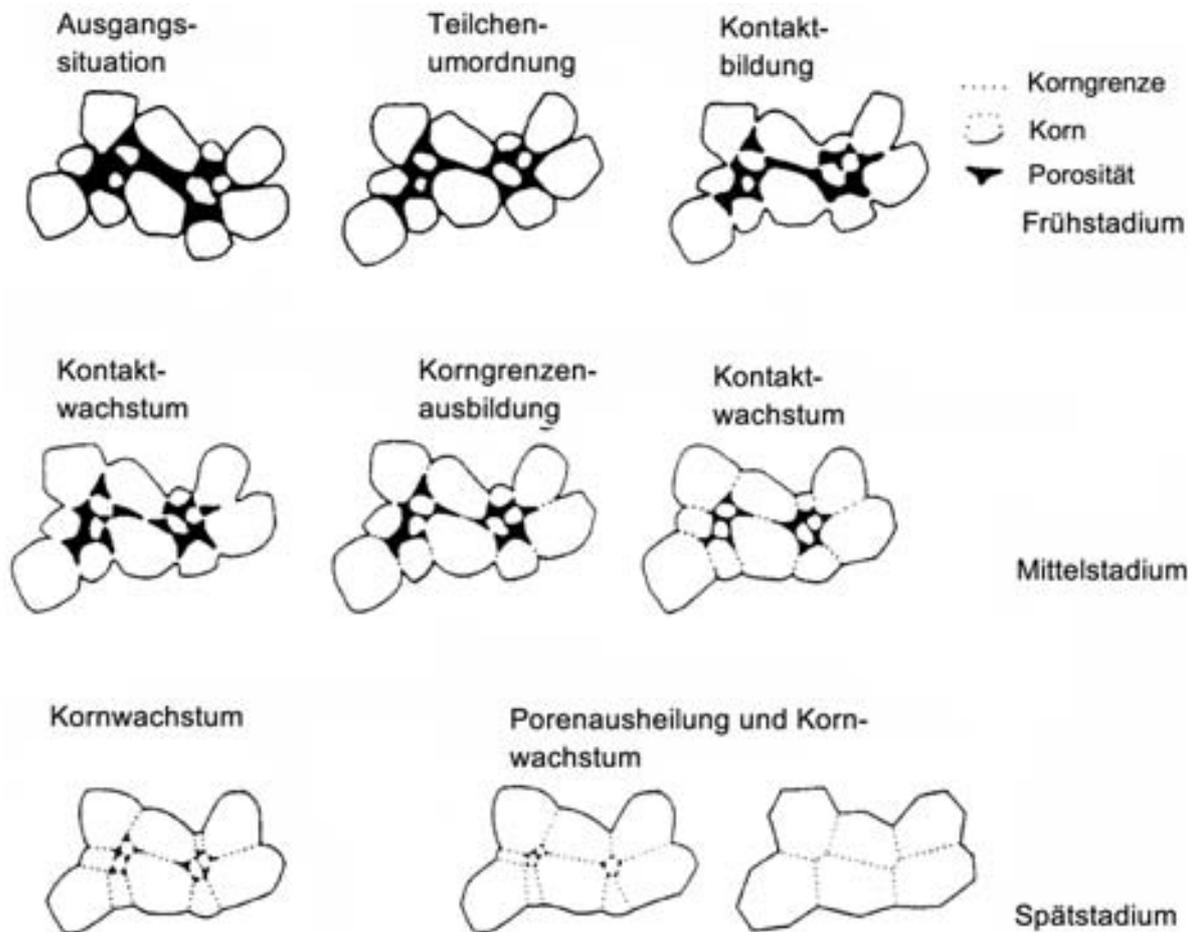
Um das Handhabungsrisiko zu reduzieren und die Alternative der *Weißbearbeitung* zu ermöglichen, kann der Formkörper im **Vorbrand** durch Verglühen mit relativ geringer Schwindungsrate vorverfestigt werden. Dazu müssen Festigkeit und Schwindungsrate über die Prozessparameter reproduzierbar eingestellt werden.

### Brennen

Das Ziel der keramischen Technologie ist die Herstellung eines mechanisch festen Körpers, der unterschiedlichsten Anforderungen und Belastungen beim Anwender standhält. Zwischen den einzelnen Teilchen des Grünlings besteht nur geringe Haftung. Die keramische Bindung und damit die hohe Festigkeit erhält man erst durch das Brennen bei hohen Temperaturen. Der Brand ermöglicht das Sintern (mit flüssiger Phase oder auch ohne) und lässt somit erst den eigentlichen keramischen Werkstoff entstehen.

Die Vorgänge beim Sintern keramischer Körper sind sehr komplex (Mehrstoffsysteme) und laufen je nach Reinheit, Korngröße, Packungsdichte und Brenn-atmosphäre unterschiedlich schnell ab. Oxidkeramische Produkte mit hohem Reinheitsgrad sintern durch Festkörperreaktion und benötigen dabei viel höhere Sintertemperaturen als

feldspathaltige Massen, wie z. B. das Porzellan mit einem hohen Anteil an Schmelzphase.



**Bild 59:** Kornwachstum während des Sinterprozesses

Durch die Vorgänge beim Brand findet eine Verfestigung und Verdichtung der Produkte statt, die sich auch in einer Abnahme der Porosität äußert. Dieser Prozess bewirkt insgesamt eine Volumenabnahme, die so genannte Brennschwindung. Diese kann für verschiedene keramische Werkstoffe sehr unterschiedlich sein.

Ähnlich wie beim Trocknen benötigen keramische Produkte beim Brennen definierte Zeiten und eine geeignete Atmosphäre. Nichteinhaltung führt zu erhöhten inneren Spannungen, zu Fehlern am Werkstück oder zu unzureichenden Eigenschaften. Dünnere Scherben und dicht geformte Werkstücke verhalten sich günstiger und lassen sich schneller brennen als großformatige mit größerer Wanddicke.



**Bild 60:** Tunnelofen

*Typische Sintertemperaturen:*

Keramik	Sintertemperatur
Tonerdeporzellan	ca. 1.250 °C
Quarzporzellan	ca. 1.300 °C
Steatit	ca. 1.300 °C
Cordierit	1.250 - 1.350 °C
Aluminiumoxid	1.600 - 1.800 °C
rekristallisiertes Siliciumcarbid	2.300 - 2.500 °C
gesintertes Siliciumcarbid	ca. 1.900 °C
Siliciumnitrid	ca. 1.700 °C

**Tabelle 5:** Sintertemperaturen keramischer Werkstoffe

Mit zunehmender Brenntemperatur steigt der Energieeinsatz für den Sinterprozess überproportional an. Neben der Energie gehören Brenn-  
hilfsmittel aus hochfeuerfestem Material, mit deren Hilfe das Brenngut  
gleichmäßig im Brennraum gestapelt wird, zum besonderen Aufwand.

Bei einigen keramischen Werkstoffen lassen sich durch speziell unter-  
stützte Sinterverfahren besondere Werkstoffvarianten erzeugen:

## Heißpressen (HP)

dient zur Herstellung von Bauteilen mit annähernd theoretischer Dichte und ist ein Sintervorgang, der durch einen Pressvorgang unterstützt wird.

## Heißisostatisches Pressen (HIP)

verleiht vorzugsweise kleinen Bauteilen höchste Dichte durch Verwendung von isostatischem Gasdruck bis 3.000 bar bei der jeweiligen Sintertemperatur bis  $\approx 2.000\text{ }^{\circ}\text{C}$  (z. B. in flexiblen Kieselglashüllen).

### 4.1.5 Abmessungen und Schwindung

Ziel der Formgebung des Grünlings aus keramischer Masse ist es, dass später Abmessungen und Form des herzustellenden gebrannten, keramischen Werkstückes möglichst genau und vollständig erreicht werden, da jegliche Nachbearbeitung gebrannter Keramik wegen ihrer außerordentlichen Härte aufwändig ist.

Im Gegensatz zu Metallen erfolgt die Formgebung der Keramik nicht als letzter Schritt in der Verfahrenskette, sondern nahezu am Anfang.

Die ungebrannten Rohlinge (Grünlinge) für die keramischen Bauteile müssen in der Regel größer geformt werden als der verlangte fertige Artikel, da als Besonderheit der keramischen Technologie in der Prozessfolge bei fast allen Werkstoffen eine Volumenverkleinerung der Bauteile auftritt. Diese beruht auf den Volumenabnahmen bei Verfahrensschritten wie, z. B. Entwässerung, Trocknung und Brand.

Erst im Sinterbrand bildet sich der eigentliche keramische Werkstoff mit seinem charakteristischen Gefüge, und aus dem Rohstoffgemisch wird der Werkstoff.

Die hohen Temperaturen führen zu einer Abnahme der spezifischen freien Oberfläche der Partikel (Diffusionsvorgänge, Bildung von Schmelzen, Phasenumwandlungen) und damit zu einer Verdichtung des Gefüges, mit der eine Verminderung des Volumens einhergeht, die als **Schwindung** bezeichnet wird. Formgebungswerkzeuge müssen deshalb mit einem „**Aufmaß**“ gegenüber der gewünschten Bauteilgeometrie ausgelegt werden, das die in den folgenden Verfahrensschritten eintretende Bauteilschwindung kompensiert.

Werkstoff	Schwindung S
siliciuminfiltriertes / rekristallisiertes Siliciumcarbid	ca. 0 %
gesintertes Siliciumcarbid	18 - 20 %
Cordierit	3 - 8 %
Tonerdeporzellan	13 - 16 %
Aluminiumoxid	17 - 20 %
Zirkoniumoxid	25 - 32 %

**Tabelle 6:** Längenschwindung einiger Werkstoffe

Bereits geringste Schüttdichteschwankungen der Pressgranulate führen beim dosierten Füllen der Pressform dazu, dass die Rohlinge unterschiedlich stark verdichtet werden und damit beim Sintern maßlich verschieden schwinden.

Die Längentoleranzen der Sinterkörper liegen daher bei Standardverfahren trotz Dichtestreuung und großer Schwindung beim Sintern bei ca.  $\pm 2\%$ . Diese Standardtoleranzen sind in DIN 40 680 festgelegt.<sup>8</sup> Durch den Einsatz von optimierten synthetischen Pulvern oder Arbeitsmassen und durch ausgefeilte Prozessführung lassen sich heute auch Toleranzen von  $< \pm 0,5\%$  garantieren.

Fertigungsschritte	Bauteil	Standardtoleranzen	Toleranzen mit Präzisionsverfahren
Formgebung/ Grünbearbeitung			
<b>Sinterung</b>		$\pm 2\%$	$\pm 1\%$
Endbearbeitung		$\pm 5\ \mu\text{m}$	$\pm 0,1\ \mu\text{m}$

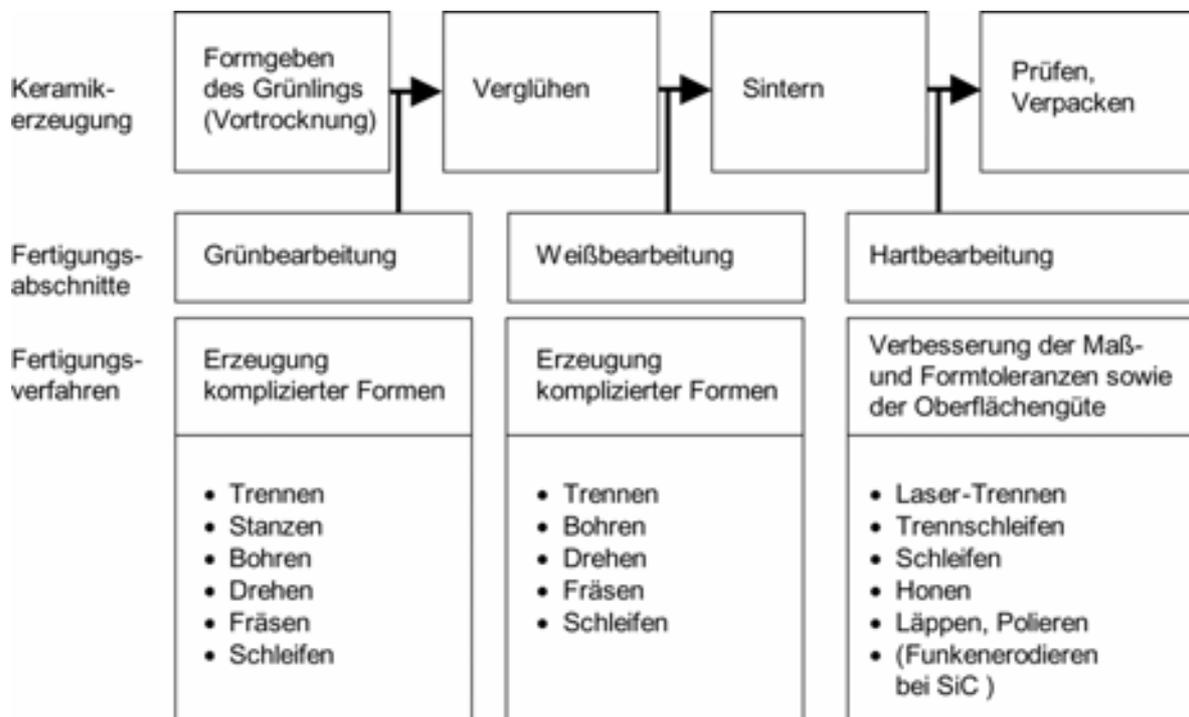
**Bild 61:** Maßtoleranzen nach dem Sintern und nach der Hartbearbeitung

<sup>8</sup> Siehe auch S. 212–221.

Alle Maße sollten, anders als bei metallischen Werkstoffen üblich, möglichst mit größeren Toleranzfeldern zu versehen, um erhöhten Fertigungsaufwand zu vermeiden. Es muss vor allem großer Wert darauf gelegt werden, dass der Anwender engere Toleranzen auf die absolut notwendigen Funktionsmaße des keramischen Bauteils begrenzt.

#### 4.1.6 Abtragende Formgebungsverfahren

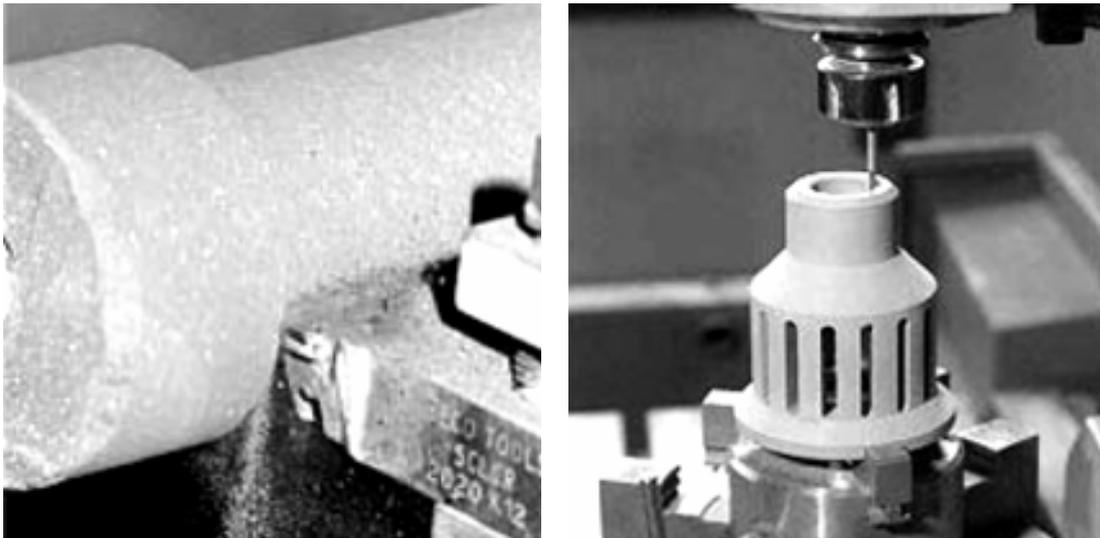
Wie Bild 62 zeigt, ist zwischen der **Grünbearbeitung** (nach dem Trocknen), der **Weißbearbeitung** (nach dem Ausbrennen und Vorbrennen) und der **Hartbearbeitung** (nach dem keramischen Brand) zu unterscheiden.



**Bild 62:** Einordnung der Grün-, Weiß- und Hartbearbeitung in den Produktionsablauf

##### **Die Grünbearbeitung**

erfolgt an getrockneten Bauteilen, die noch organische Hilfsstoffe enthalten. Sie ist zur Fertigung von Einzelteilen und Kleinserien gut geeignet und wird auch bei großen Serien zur Herstellung von durch das Urformgebungsverfahren nicht realisierbaren Formen, z. B. Bohrungen quer zur Pressrichtung beim Trockenpressen, verwendet.



**Bild 63 und 64:** Grünbearbeitung von Bauteilen

### ***Die Weißbearbeitung***

erfolgt an vorgebrannten Bauteilen, die von organischen Hilfsstoffen frei sind. Die Festigkeit wird durch den Vorbrand bestimmt.

So können mit konventionellen, keramischen oder diamantbestückten Werkzeugen extrem hohe Abtragsleistungen bei relativ geringem Werkzeugverschleiß erzielt werden. Dieses Verfahren wird heute von den Bauteilherstellern sowohl für die Prototypenfertigung als auch für die Massenfertigung genutzt.

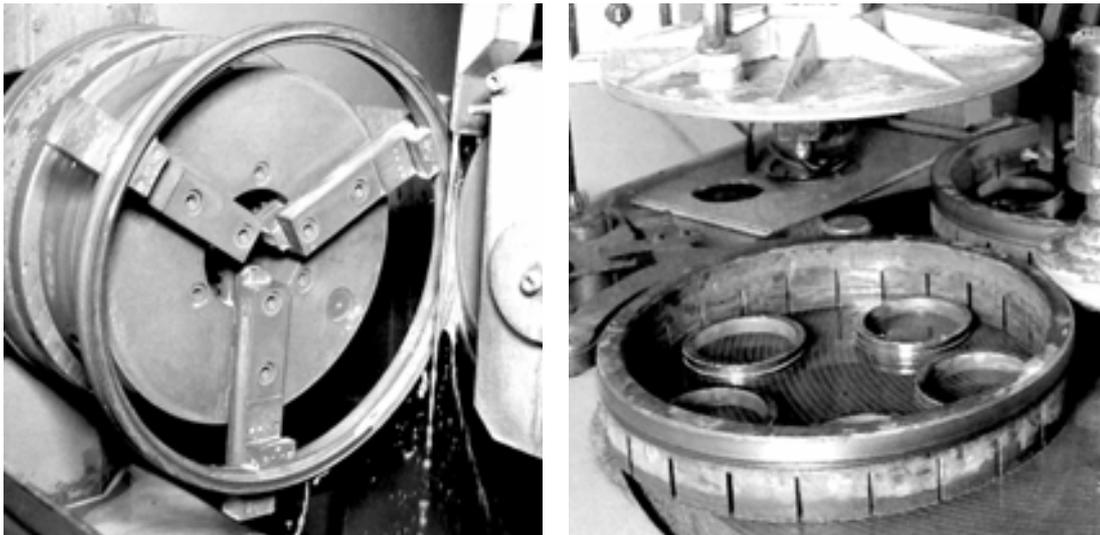
## **4.2 Veredelung**

### **4.2.1 Hartbearbeitung**

#### **Die Endbearbeitung (Hartbearbeitung)**

erfolgt an fertig gebrannten Bauteilen, die durch die Formgebung, Grün- oder Weißbearbeitung schon so nah wie möglich an die Endabmessungen herangeführt wurden. Durch abtragende Endbearbeitungsverfahren können engste Toleranzen realisiert werden.

Die hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit, Formenvielfalt und Oberflächengüte verlangen für das Bearbeiten keramischer Bauteile den Einsatz moderner Werkzeugmaschinen. Wegen der großen Härte der keramischen Werkstoffe kommen hier überwiegend Diamantwerkzeuge (gebundenes oder loses Korn) zum Einsatz.



**Bild 65 und 66:** Hartbearbeitung von Bauteilen: Form-, Planschleifen

Verfahren	Bearbeitungswerkstoff	Bearbeitungsziel
Schleifen	mechan. gebundenes Korn, nass; Diamantschleifscheibe	Grob- bzw. Feinbearbeitung (z. B. Profil-, Lagerflächen), Fertigung von Funktionsflächen unter Einhaltung der geforderten Toleranzen und Oberflächengüten
Trennschleifen	mechan. gebundenes Korn, nass; Diamanttrennscheibe, Diamantschleifscheibe	Trennen von Rohlingen
Honen	mechan. loses Korn, nass; Diamanthonleiste	Verbessern der Maßgenauigkeit und Oberflächengüte (z. B. Gleitflächen)
Läppen, Polieren	mechan. loses Korn, nass; Diamantläppgemisch	Verbessern der Maßgenauigkeit und Oberflächengüte (z. B. Anschliffpräparation, Dichtflächen)
Ultraschallschwingläppen	mechan. loses Korn, nass; Diamantläppgemisch	Bohren, Gravieren
Wasserstrahlschneiden	mechan. loses Korn, nass	Trennen
Sandstrahlen	mechan. loses Korn, trocken	Beseitigen von weichen Bestandteilen auf der Oberfläche; Aufrauen von Oberflächen
Funken-erodieren	elektrisch; Kupfer-, Wolfram- oder Grafit Elektrode	komplexe Formen, praktisch nur an SISIC
Lasern	thermisch; CO <sub>2</sub> -Laser	Bohren, Trennen, Schneiden

**Tabelle 7:** Mögliche Endbearbeitungsverfahren

Zentrale Bedeutung hat das **Schleifen**. Den Schleifvorgang und das Schleifergebnis beeinflussen viele Faktoren. Für das einzelne Werk-

stück wird daher die passende Schleifscheibe sehr sorgfältig nach Kornart, Korngröße, Bindung und Härte der Scheibe ausgewählt. Extrem ebene Flächen, z. B. Gleit- und Dichtflächen, müssen nach dem Schleifen durch **Läppen** und zum Schluss durch **Polieren** behandelt werden.

### 4.2.2 Oberflächencharakteristiken

Im Folgenden werden Oberflächencharakteristiken in Abhängigkeit von den wichtigsten Hartbearbeitungsverfahren beschrieben.

Definitionen für Oberflächenmessgrößen und Beispiele sind auf S. 231 dargestellt.

#### 4.2.2.1 Geschliffene Oberflächen

Charakteristisch für das Schleifen ist die Überlagerung einer Vielzahl bahngebundener Ritzbewegungen der Schleifkörner in einer Hauptwirkrichtung parallel zur Werkstückoberfläche. Die Ritzbewegung des Schneidkorns induziert direkt Mikrorisse und spröde Ausbrüche und/oder Plastifizierungen sowie duktilen Abtrennen von Keramikpartikeln.

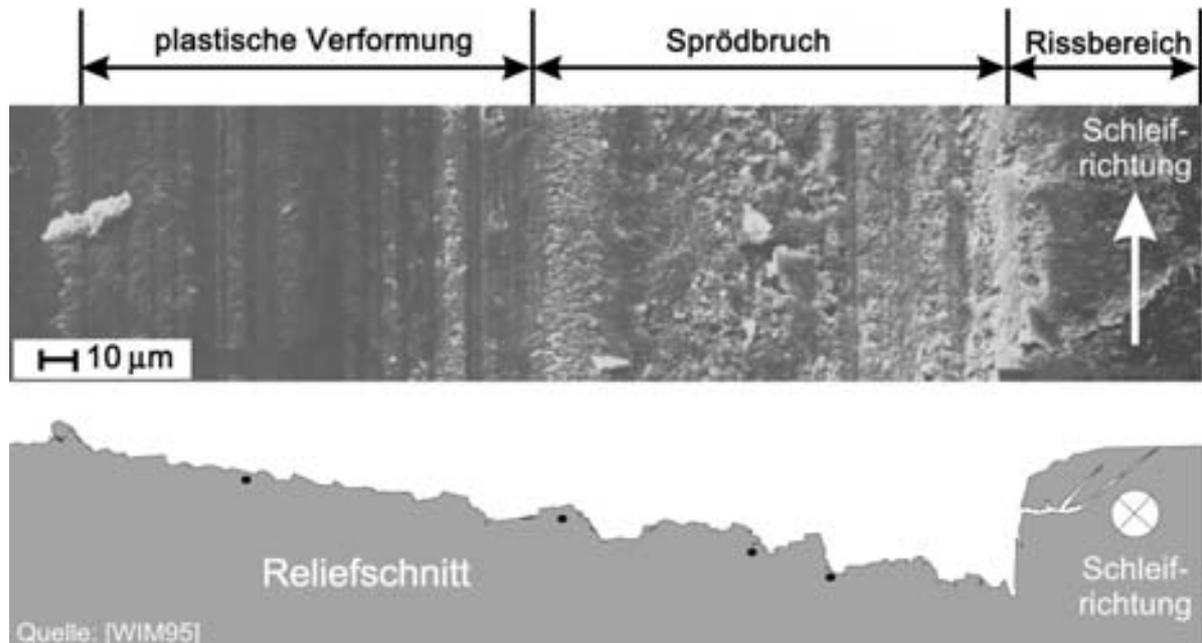
Bild 67 zeigt anhand von Bearbeitungsspuren die Werkstofftrennmechanismen mit den deutlich zu unterscheidenden Bereichen für vorwiegend plastische Verformungen, vorwiegenden Sprödbbruch sowie einem Rissbereich. Letzterer ist durch mikroskopische Axial-, Radial- und Lateralrisse gekennzeichnet.

Oberflächen, deren Entstehung wesentlich von plastischen Verformungsvorgängen bestimmt werden, weisen als Oberflächencharakteristika Riefen, Verrundungen, Schichtungen, Schuppen und eine verhältnismäßig geringe Zahl von Ausbrüchen auf. Hier spricht man von „*duktilen Zerspanen*“.

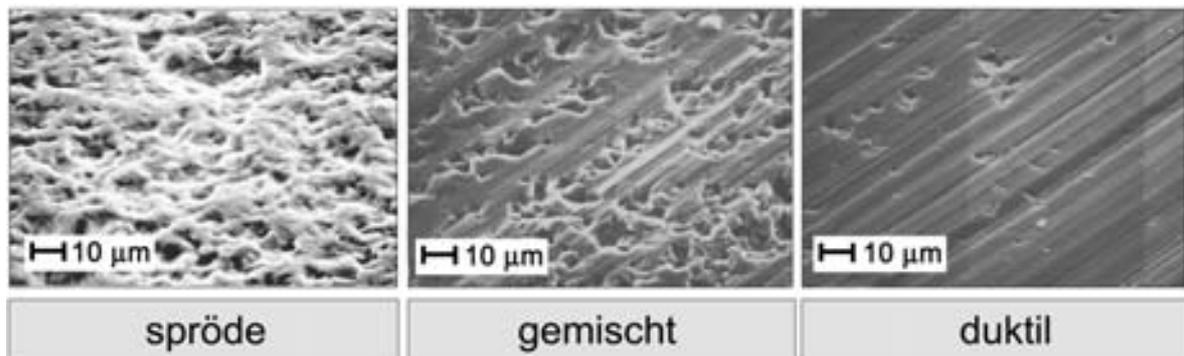
Im Gegensatz dazu ist für das „*spröde Zerspanen*“ eine Vielzahl von Ausbrüchen, Aufwerfungen, Schollen und Abplatzungen typisch.

In der Regel kommt es beim Schleifen einer Oberfläche sowohl zu duktiler als auch zu spröder Zerspanung. Welcher dieser Werkstofftrennmechanismen vorherrscht, wird von den lokalen Spannungsbedingungen an den Einzelkörnern des Keramikgefüges während des

Ritzvorgangs bestimmt. Der Übergang von spröder zu duktiler Zerspanung hängt insbesondere vom Überschreiten einer werkstoffabhängigen, kritischen Spannungsdicke am Einzelkorn, aber auch von der Mikrogeometrie der Schneidkörner ab.



**Bild 67:** Unterschiedliche Werkstofftrennmechanismen bei geschliffenem Siliciumnitrid

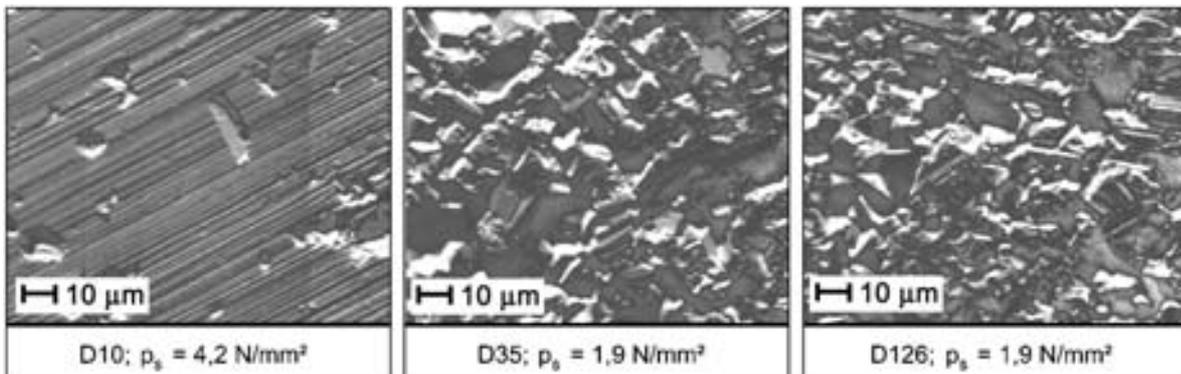


**Bild 68:** Oberflächen spröde, gemischt und duktil geschliffener Keramiken

#### 4.2.2.2 Gehonte Oberflächen

Charakteristisch für das Honen ist die Überlagerung einer Vielzahl kraftgebundener Ritzbewegungen von Schneidkörnern durch den Werkstoff und ein flächenhafter Werkzeugeingriff mit einer Hauptwirkrichtung parallel zur Werkstückoberfläche. Aufgrund der um etwa eine Größenordnung geringeren Schnittgeschwindigkeiten ist der thermische

Einfluss beim Honen gegenüber dem Schleifen vergleichsweise gering. Infolgedessen zeigen gehonte keramische Oberflächen in der Regel keine Aufschmelzungen oder thermisch bedingten Risse. Es treten wie beim Schleifen duktile und spröde Werkstofftrennmechanismen nebeneinander auf. Welcher Mechanismus überwiegt, wird wesentlich von der Schneidkorneindringtiefe und der Schnittgeschwindigkeit bestimmt.



**Bild 69:** Oberflächenausbildung in Abhängigkeit von Schneidkorngröße  $D$  und Anpressdruck  $p_s$  beim Honen von Aluminiumoxid

Beim Honen wirken sich bei spröder Zerspanung höhere Schnittgeschwindigkeiten positiv auf das Zeitspanungsvolumen aus. Für die Oberflächengüte sind höhere Schnittgeschwindigkeiten jedoch aufgrund der stärkeren Rissinduzierung, die zu Ausbrüchen und Abplatzungen führen kann, von Nachteil.

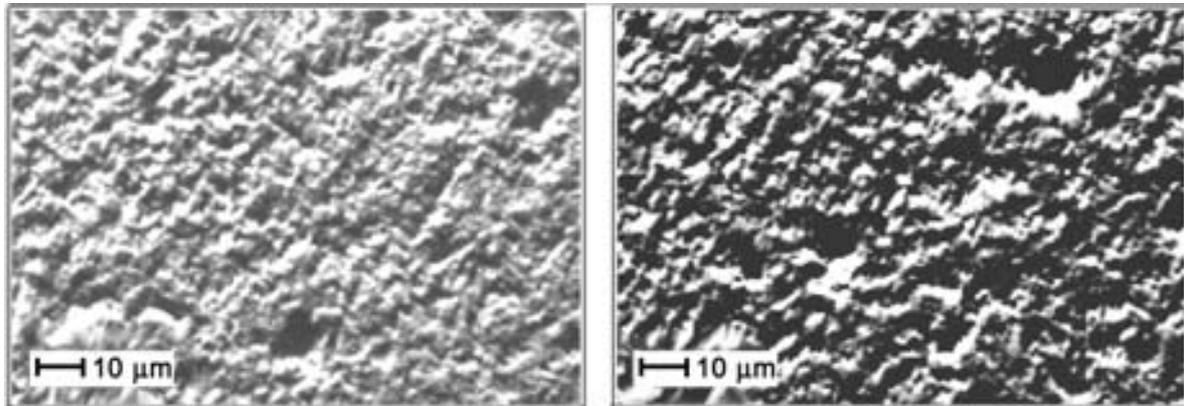
### 4.2.2.3 Geläppte Oberflächen

Läppen wird nach DIN 8589 definiert als Spanen mit losem, in einer Paste oder Flüssigkeit verteiltem Korn, dem Läppgemisch, das auf einem meist formübertragenden Gegenstück (Läppwerkzeug) bei möglichst ungeordneten Schneidbahnen der einzelnen Körner geführt wird.

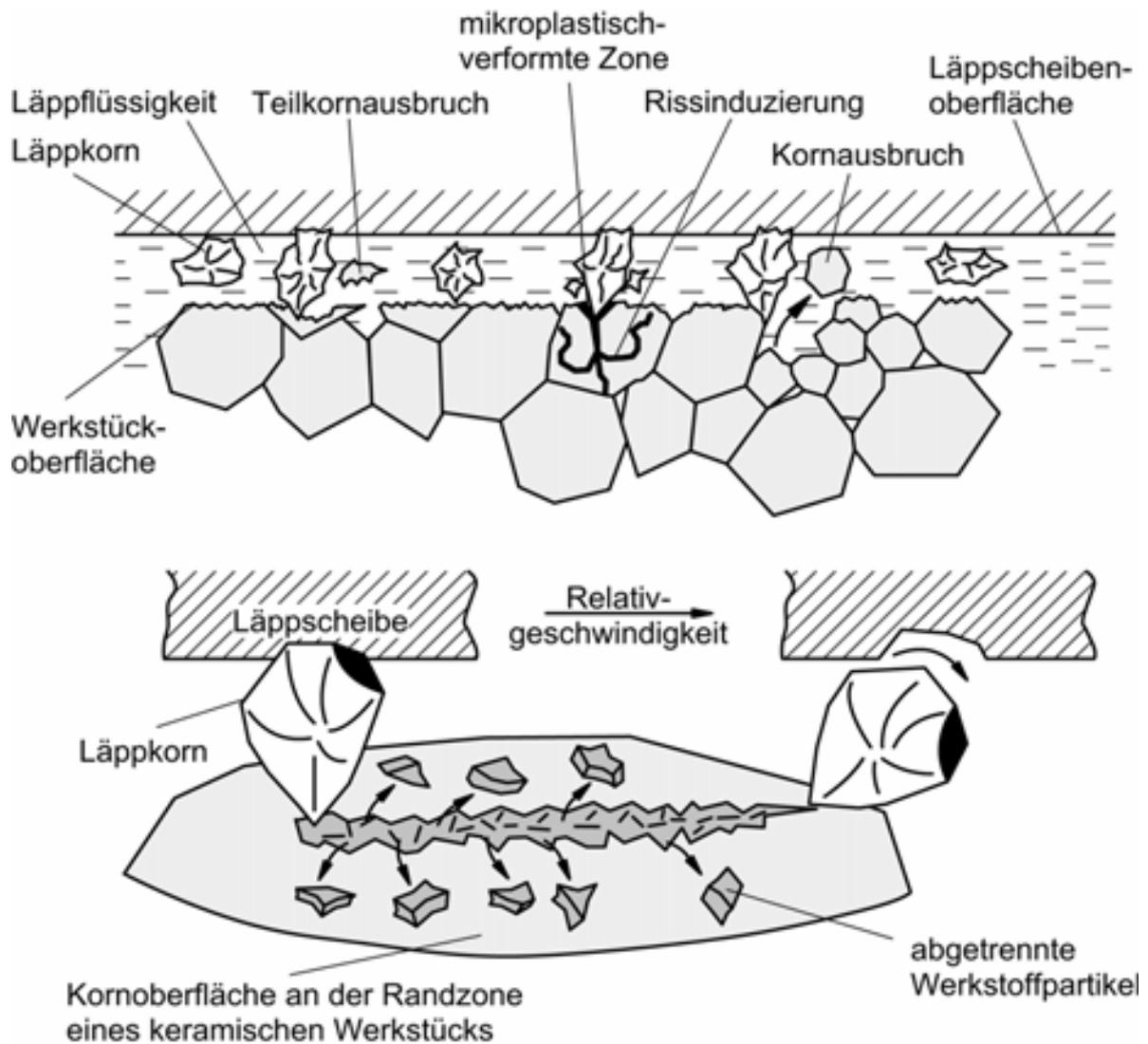
Aufgrund der niedrigen Zeitspanungsvolumina werden Läppprozesse zur Verbesserung von Formgenauigkeiten und Oberflächengüten eingesetzt. Charakteristisch sind die mikrogeometrisch nahezu isotropen Oberflächentopografien mit regellos angeordneten Riefen, einer Vielzahl sehr homogen verteilter Mulden sowie vereinzelt interkristallinen Oberflächenausbrüchen. Diese Strukturen erweisen sich vielfach bei hohen tribologischen oder optischen Funktionsanforderungen als vorteilhaft.

Beim Läppen wird Material der Oberfläche durch die Rollbewegung der

Schneidkörper und durch Ritzen mit den Schneidkörnern, die sich temporär in der Läppscheibe verankert haben, abgetragen.



**Bild 70:** Mit Läppkorn F180 und F800 geläppte Siliciumcarbidoberflächen



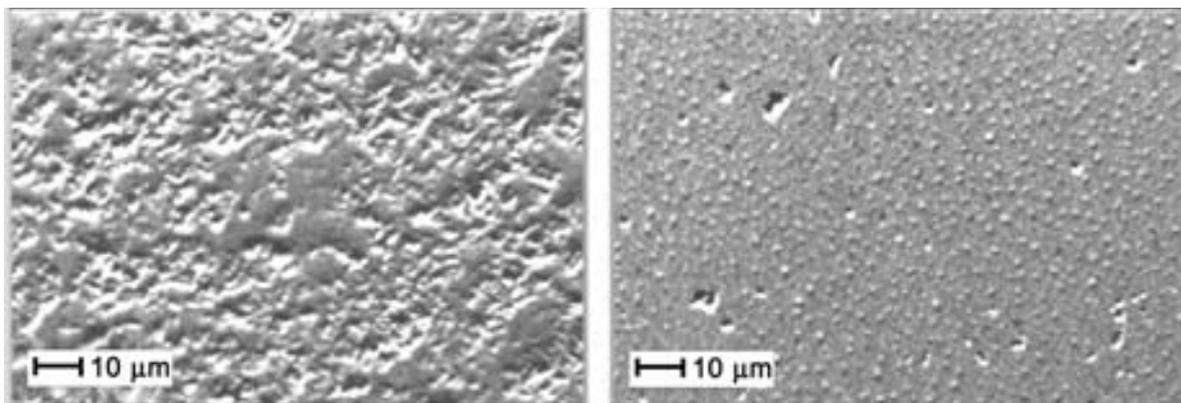
**Bild 71:** Modelle der Werkstofftrennung beim Läppen

Die beim Läppen erreichbaren Oberflächengüten sind vom Gefüge des bearbeiteten keramischen Werkstoffes abhängig. Je feinkörniger und dichter der Werkstoff ist, umso höher ist die erreichbare Oberflächengüte. Je nach Korngröße, Einstellbedingungen und Gefügebau der zu läppenden Keramik sind Formgenauigkeiten von  $1 \mu\text{m}/\text{m}$ , Planparallelitäten bis zu  $0,2 \mu\text{m}$  und Mittenrauwerte  $R_a < 0,3 \mu\text{m}$  erreichbar.

### 4.2.2.4 Polierte Oberflächen

Polieren ist nach DIN 8589 kein eigenständiges Fertigungsverfahren und wird nur in Verbindung mit anderen Fertigungsverfahren eingesetzt. Man unterscheidet Verfahren, wie z. B. Polierschleifen, Polierhonen, Polierläppen und elektrolytisches Polieren sowie Polieren durch Beschichten (Auftragen von Politur mit mechanischer Bearbeitung). Durch Polieren sollen vorrangig hohe Oberflächengüten erzeugt werden. Im Gegensatz zum Läppen ist das Polierkorn in einem Tuch oder einer Polierscheibe eingebettet, sodass eine gerichtete Werkzeugbewegung realisiert wird, welche für die Erzeugung optisch spiegelnder Oberflächen notwendig ist. Polieren ist wegen der geringen Zeitspannungsvolumina zeitaufwändig.

Bei der Keramikbearbeitung wird in der Regel nur bei äußerst hoher punktueller Druckbelastung eine geringfügige plastische Deformation erreicht. Daher ist die Materialabnahme beim Polieren von Keramik durch ein Ritzen mit Spannungsdicken im Nanometerbereich erklärbar. Polierte Oberflächen sind in Abhängigkeit von der Polierzeit und dem eingesetzten Polierkorn durch glatte Bereiche und Mulden charakterisiert. Andere Oberflächencharakteristika sind nur vereinzelt anzutreffen und nicht typisch.



**Bild 72:** Mit  $9 \mu\text{m}$  und  $0,25 \mu\text{m}$  Polierkorn polierte Siliciumcarbidoberflächen

### 4.2.3 Metallisieren

Einige Hersteller von Technischer Keramik bieten metallisierte Keramik an. Als Basismaterial ist Aluminiumoxid und Aluminiumnitrid verfügbar. Die angebotene Metallisierung eignet sich für das Hartlöten und natürlich auch für das Weichlöten und besteht aus einer Grundmetallisierung aus Wolfram mit einer Schichtdicke von min. 6  $\mu\text{m}$ , die im Siebdruckverfahren aufgebracht und eingebrannt wird. Für besseren Lotfluss liegt darüber eine stromlos aufgebrachte Nickelschicht mit min. 2  $\mu\text{m}$  Dicke. Andere Schichtdicken sind möglich.

Zum Korrosionsschutz kann eine im Sudgoldverfahren abgeschiedene Goldschicht von ca. 1  $\mu\text{m}$  aufgebracht werden. Alternativ können die galvanischen Nickelschichten mit einer bondfähigen Goldschicht verstärkt werden. Für die Verwendung von Weichlot kann auch eine zusätzliche Zinnschicht aufgetragen werden.

### 4.2.4 Glasieren und Engobieren

Ein keramisches Produkt weist je nach Korngröße der Ausgangsmaterialien und der beim Brand entstandenen kristallinen Phase eine bestimmte Oberflächenrauheit auf, die vor allem Verschmutzungen begünstigt.

Durch das Aufbringen einer **Glasur** wird die Oberfläche geglättet und auch farblich verschönert. Vor allem verbessert die Glasur aber ganz entscheidend viele technisch wichtige Eigenschaften des keramischen Produkts (z. B. elektrisches Verhalten, mechanische Festigkeit, chemische Beständigkeit und Ähnliches).

Die Glasur ist flussmittelreicher als der gebrannte Keramikkörper, der Scherben. Bei hohen Brenntemperaturen wirkt sie deshalb lösend auf den Scherben. Die Folge ist die Ausbildung einer Zwischenschicht, die beim fertigen Produkt zu einer festen Verzahnung der Glasur mit dem darunter liegenden Scherben führt. Durch das Beimischen von Farbkörpern (Metalloxide) lassen sich die verschiedensten Glasurfarben erzielen.

Für den festigkeitssteigernden Effekt muss die Glasur sehr genau an den Wärmedehnungskoeffizienten des Scherbens angepasst werden. Leichte Druckspannungen in der Glasur erhöhen die Festigkeit des Fertigprodukts, Zugspannungen erniedrigen diese und sind daher unerwünscht.

**Engoben** werden als dünne mineralische Beschichtungen auf keramische Oberflächen durch Tauchen, Walzen, Spritzen oder Pinseln aufgetragen.

Anders als Glasuren sind Engoben porös und weitgehend frei von Glasphase. Sie bestehen in der Regel aus feuerfesten Oxiden ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ), Gemischen daraus oder feuerfesten Mineralen wie Mullit, Spinell, Zirkonsilikat, aber auch Kaolin oder Ton.

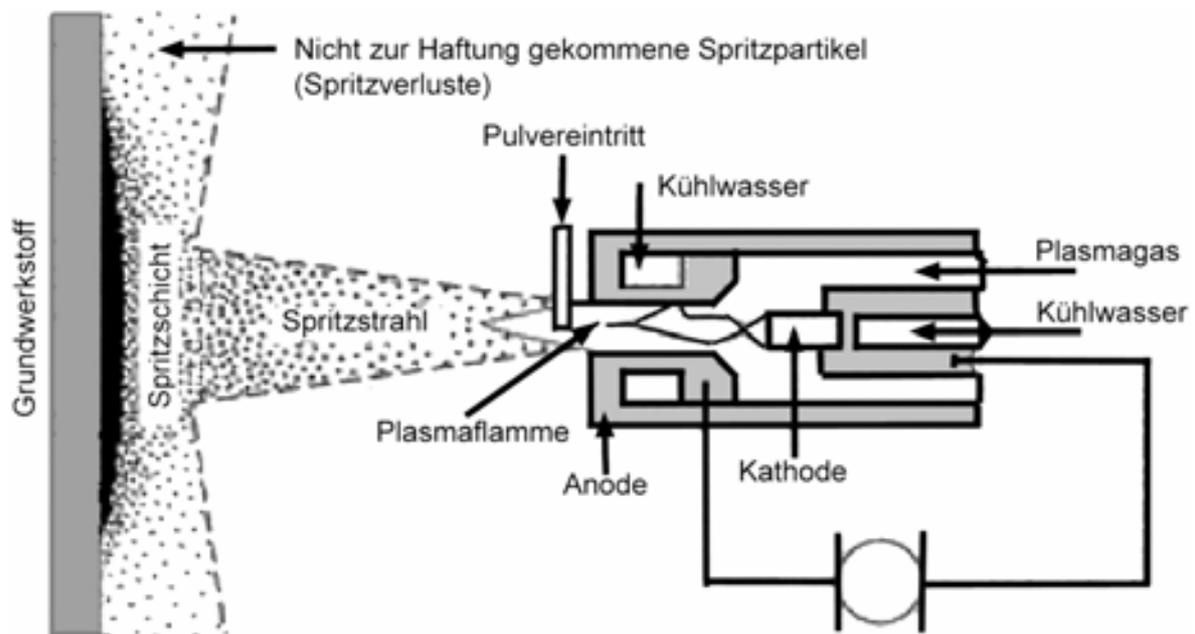
Engoben dienen in der Brenntechnik zum Schutz keramischer Oberflächen vor mechanischen oder korrosiven Angriffen. Auf feuerfesten Brennhilfsmitteln wie Platten, Balken oder Kapseln verhindern Engoben Kontaktreaktionen mit dem aufliegenden Brenngut oder Klebeeffekte durch ablaufende Glasur von Brenngut, welches auf dem engobierten Brennhilfsmittel steht.

### 4.2.5 Keramische Schichten

Für die Oberflächenveredelung werden keramische Schichten genutzt, welche an die hervorragenden Eigenschaften der Keramik, wie hohe Härte und Verschleißbeständigkeit, elektrische Isolation, niedrige Wärmeleitfähigkeit und reproduzierbare Oberflächenstrukturen anknüpfen.

Bei der Herstellung keramischer Schichten unterscheidet man zwischen der Dickschichttechnik und der Dünnschichttechnik.

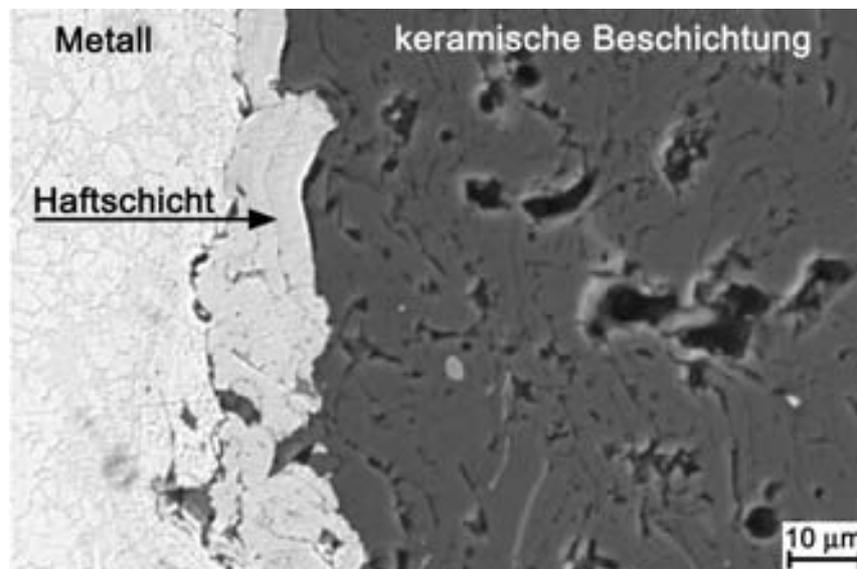
Dicke Schichten ( $> 20 \mu\text{m}$ ) werden u. a. durch thermisches Spritzen aufgetragen. Hier hat sich das Plasmaspritzen hervorragend bewährt. Beim Plasmaspritzen werden in der ca.  $10.000^\circ\text{C}$  heißen Plasmaflamme oxidkeramische Pulver bzw. Pulvergemisch wie Aluminiumoxid, Aluminiumoxid/Titandioxid, Zirkoniumoxid und Chromoxid aufgeschmolzen und auf die vorher sandgestrahlte Metalloberfläche aufgetragen.



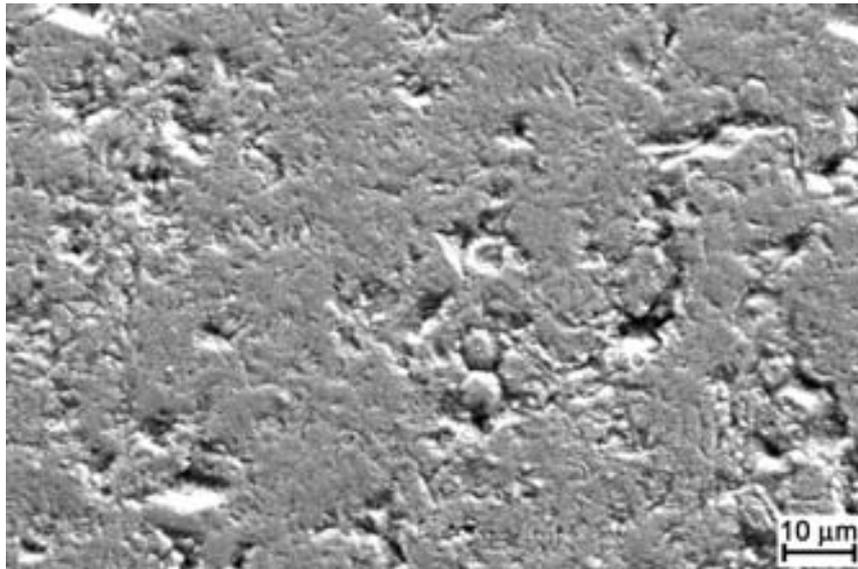
**Bild 73:** Prinzip des Plasmaspritzens

Vor dem Plasmaspritzen muss jedoch dafür gesorgt werden, dass durch Sandstrahlen eine zerklüftete Oberfläche entsteht, in die sich die auftreffenden Keramikpartikel gut verkrallen können.

Es werden mehrere Einzelschichten aufgetragen, sodass sich ein lamellarer Schichtaufbau mit einer guten Haftfestigkeit ergibt.



**Bild 74:** Schliff einer Beschichtung mit Zwischenschicht



**Bild 75:** Geschliffene Oberfläche einer Chromoxidbeschichtung

Vorteil des Verfahrens ist, dass alle metallischen Grundwerkstoffe (Magnesium ausgenommen) keramikbeschichtet werden können. Aufgespritzt werden oxidkeramische Pulver wie z. B. reines weißes Aluminiumoxid für die elektrische Isolation und als Verschleißschutz, Zirkonoxid für die thermische Isolation. Für den Verschleißschutz kommen auch Gemische aus Aluminiumoxid und Titandioxid in verschiedenen Zusammensetzungen zum Einsatz. Titandioxid stabilisiert die Alpha-Phase von Aluminiumoxid und macht die Keramiksicht zäh, stoß- und bruchfest. Die Farbe verändert sich je nach Zusatz von grau über blaugrau bis hin zu schwarz. Bei Lagern und Pumpen wird Chromoxid wegen seiner günstigen Reibungseigenschaften gegenüber metallischen Werkstoffen empfohlen. Eine Zwischenschicht aus Chrom-Nickel verbessert die Haftfestigkeit.

Die keramische Oberfläche wird durch Nachbearbeitung auf eine reproduzierbare Oberflächenrauheit eingestellt. Dabei hat sich bei den meisten Anwendungen die Standardoberfläche mit  $R_a = 1,5$  bis  $2 \mu\text{m}$  bewährt. Durch Hartbearbeitung erhält man eine glatte glänzende Oberfläche mit  $R_a \approx 0,5 \mu\text{m}$ .

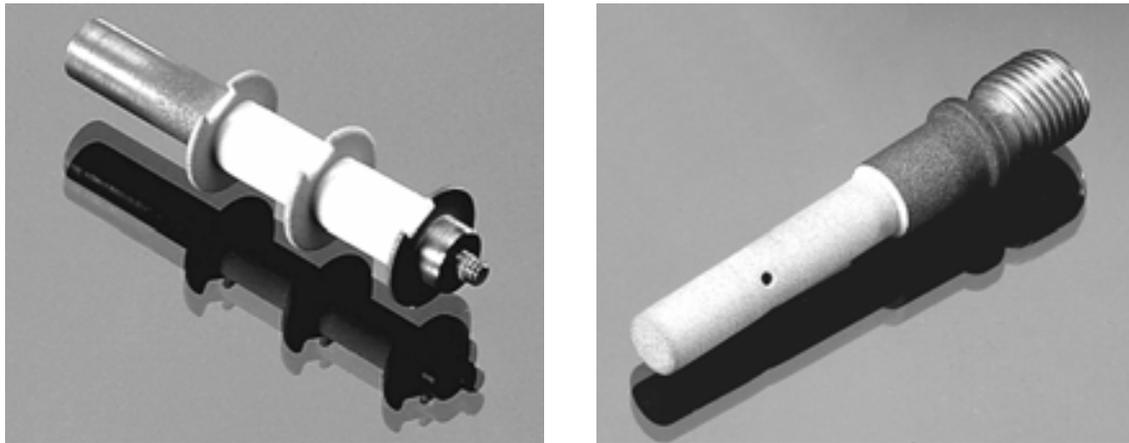
Die Härte der Keramiksichten liegt für Aluminiumoxid bei  $HV \approx 1.800$ . Zum Vergleich hierzu liegt die Härte von gehärtetem Stahl bei  $HV \approx 700$  und von hartverchromten Oberflächen bei  $HV \approx 1.200$ .



**Bild 76:** Bauteile mit Beschichtungen für den Verschleißschutz

Der Vorteil einer 0,1 bis 0,5 mm starken Isolationsschicht liegt in der Platzeinsparung. Sie ist zudem unempfindlich gegen Hitze, Schlagbeanspruchung, Licht und bis zu einem gewissen Grad gegen aggressive Medien und Verschleiß, wobei wegen der lamellaren porösen Struktur in korrosiver Umgebung für das Trägermaterial rostfreier Stahl zu empfehlen ist. Eine wichtige Anwendung der keramischen Beschichtung ist die elektrische Isolation für Betriebstemperaturen über 200 °C (bis ca. 500 V), so beispielsweise bei Heizpatronen. Bis 600 °C ist eine zuverlässige Haftung der Keramiksicht gewährleistet.

Die Metallteile sollten frei von sichtbaren Lunkern, Riefen und Löchern sein, da die Keramiksicht die Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche abbildet. Empfohlen wird eine fein gedrehte oder polierte Metalloberfläche von  $R_z \approx 8$  bis 16  $\mu\text{m}$ . Die Dicke der Metallteile sollte mindestens 1 mm sein, da es sonst zu einem Wärmestau kommt und sich die Teile verziehen. Dünne Bleche und dünne Drähte können daher nicht plasmabeschichtet werden. Die maximale Länge der zu beschichtenden Metallteile ist abhängig von den Absaugeinrichtungen und der Peripherie und beträgt im Allgemeinen 2 m.



**Bild 77 und 78:** Bauteile mit Beschichtungen für elektrische und thermische Isolation

Die Haftfestigkeit auf den Kanten ist eingeschränkt. Deshalb sollten Kanten mit einem Radius  $> 0,7$  mm verrundet werden. Zu einer beschichtungsgerechten Konstruktion gehört die Berücksichtigung des Spannungsbereichs (Gewinde oder Stifte). Prinzipiell kann auch partiell beschichtet werden. Die metallischen Oberflächen werden dann entsprechend abgedeckt.

Das Beschichtungsverfahren mit Keramik eignet sich sowohl für Versuchsserien von 1 bis 10 Stück als auch für Großserien von 10.000 Stück und mehr.

Dieses Verfahren steht für die Möglichkeit, kurzfristig und schnell zu produzieren. Mit ihm ist es möglich, innerhalb weniger Tage Metallteile auf CNC-Automaten herzustellen, zu beschichten und zu bearbeiten.

Interessant sind auch Reparaturbeschichtungen. Verbrauchte Keramikschichten, die im harten Betriebsalltag Schlägen und Stößen ausgesetzt wurden, sind einfach abzustrahlen. Teuere Metallteile können ausgeschliffen und neu keramikbeschichtet werden.

Gut bewährt haben sich Plasmaspritzschichten z. B. im Textil- und Drahtmaschinenbau.

Dünnschichten ( $< 20$   $\mu\text{m}$ ) werden durch PVD (Physical Vapour Deposition) oder CVD (Chemical Vapour Deposition), durch galvanische Verfahren oder durch Sol-Gel-Verfahren erzeugt. Hier haben sich z. B. bei Werkzeugen die bekannten, goldgelben TiN-Schichten bewährt.

## 5 Eigenschaften Technischer Keramik

### 5.1 Allgemeiner Vergleich

Die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten keramischer Erzeugnisse beruhen auf den spezifischen Eigenschaften keramischer Werkstoffe, die in vielen Beziehungen von anderen Werkstoffen nicht erreicht werden. Als positive Eigenschaften sind hervorzuheben:

- niedrige Dichte,
- große Härte,
- hohe mechanische Festigkeit,
- Formstabilität (spezifische Steifigkeit),
- Verschleißbeständigkeit,
- Korrosionsbeständigkeit (Beständigkeit gegen chemische Einflüsse),
- Witterungsbeständigkeit,
- hohe zulässige Einsatztemperatur,
- niedrige oder hohe Wärmeleitfähigkeit,
- hohes elektrisches Isoliervermögen sowie
- dielektrische und ferroelektrische Eigenschaften.

Je nach Zusammensetzung und Aufbereitung der verwendeten Rohmaterialien sowie nach Formgebung und Art des Brennens können die Eigenschaften der jeweiligen Erzeugnisse dem beabsichtigten Verwendungszweck im hohem Maße angepasst werden.

Bild 79, das die wichtigsten Eigenschaften vergleicht, erleichtert die Einschätzung des Eigenschaftsprofils von **Technischer Keramik** gegenüber Metallen und Polymeren.

## Eigenschaften

	Keramik	Metall	Polymere
Härte			
E-Modul			
Hochtemperaturfestigkeit			
Thermische Ausdehnung			
Duktilität			
Korrosionsbeständigkeit			
Verschleißbeständigkeit			
Elektrische Leitfähigkeit			
Dichte			
Wärmeleitfähigkeit			

Tendenz zu hohen Werten      Tendenz zu niedrigen Werten

**Bild 79:** Vergleich der Eigenschaften von Keramiken, Metallen und Polymeren

Die Pfeilrichtung deutet die Tendenz im Vergleich der Kennwerte an. Die Aussage muss in Abhängigkeit vom Einsatzfall bewertet werden. Ein dicker Pfeil weist auf eine besonders starke Ausprägung des Merkmals hin.

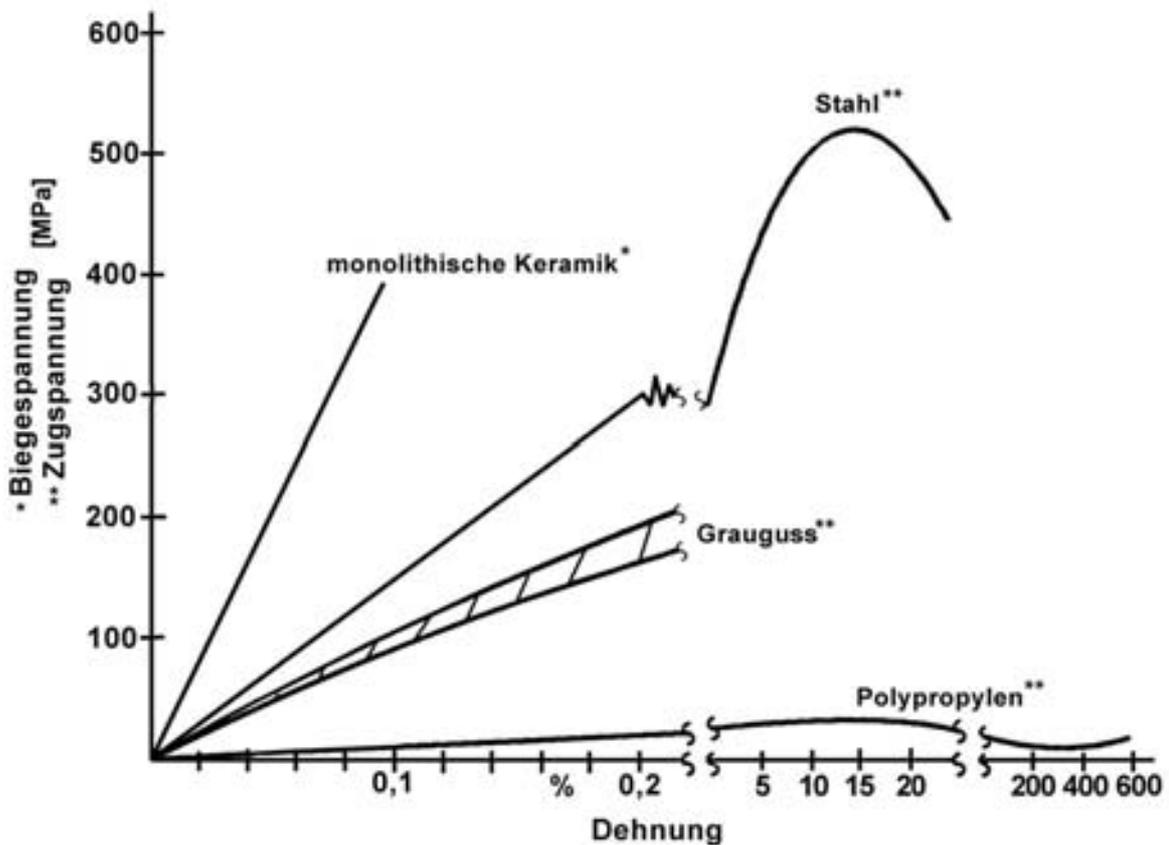
Die charakterisierenden Eigenschaften<sup>9</sup> der Werkstoffe Metall, Keramik und Kunststoff erklären sich aus den unterschiedlichen Bindungsarten.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Weitere Werkstoffvergleiche sind auf den folgenden Seiten dieses Kapitels dargestellt.

<sup>10</sup> Siehe Kap. 10, S. 209, Bindungsarten und Festigkeit.

## 5.2 Zuordnung nutzbarer Eigenschaften

Das für die mechanische Anwendung oft entscheidende Spannungs-Dehnungs-Verhalten ist in Bild 80 am Beispiel eines Stahls, einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik und eines Thermoplasten veranschaulicht. Die begrenzte Bruchdehnung der Keramik<sup>11</sup> in Verbindung mit der gegenüber Metallen deutlich niedrigeren Bruchzähigkeit  $K_{IC}$  ist als prinzipieller Nachteil einzustufen, obwohl sie gleichzeitig den Vorteil der Formstabilität, insbesondere auch bei hohen Temperaturen, beinhaltet.



**Bild 80:** Spannungs-Dehnungs-Verhalten ausgesuchter Werkstoffe

<sup>11</sup> Weitere Kennwerte keramischer Werkstoffe finden sich auf den S. 263–273.

## Eigenschaften

Werkstoff- eigenschaften	Porzellan	Steatit	Aluminium- oxid (> 99 %)	Zirkonium- oxid PSZ	Siliciumnitrid			SIALON	Siliciumcarbid			Baustahl	Grau- guss
					SSN	HPSN	RBSN		SSIC	RSIC	SISIC		
Dichte g/cm <sup>3</sup>	2,30	2,70	3,94	6,00	3,30	3,40	2,50	3,00	3,15	2,80	3,12	7,85	7,30
Biegefestigkeit (25 °C)	110	140	520	1.000	1.000	900	330	355	600	120	450	300 - 450	95 - 170
Biegefestigkeit (1000 °C)	-	-	-	-	-	-	300	355	650	130	450	-	-
E-Modul GPa	70	110	360	210	330	800	180	231	450	280	350	200 - 210	70 - 130
Bruchzähigkeit MNm <sup>-3/2</sup>	-	-	5,5	> 8	8,5	8,5	4,0	2,2	5,0	3,0	5,0	140,0	-
Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> (20-1000 °C)	8,0	8,5	8,0	5,0	3,5	3,3	3,0	3,0	4,8	4,8	4,8	10,0	12,0
Weibull-Modul m	-	-	> 10	> 15	> 10	> 10	> 10	15	> 10	-	> 10	-	-

(\*) Angabe nicht üblich

**Tabelle 8:** Vergleich typischer mechanischer Kennwerte einiger Keramiken mit Grauguss und Baustahl

Technische Gliederung	Anwendungsrelevante Eigenschaften
mechanisch	Dichte, Festigkeit, Härte, Steifigkeit, Verschleißbeständigkeit
thermisch	hohe/niedrige Wärmeleitfähigkeit, thermische Ausdehnung, Temperaturfestigkeit, Alterungsbeständigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit, Thermoschockbeständigkeit
chemisch/ biologisch	Korrosionsbeständigkeit, Adsorptionsfähigkeit, Biokompatibilität, Inertheit
elektrisch	Durchschlagfestigkeit, elektrische Isolation, Stehspannungsfestigkeit, Verlustfaktor, Permittivitätszahl, spez. Halbleitereigenschaften
elektro- mechanisch	Piezoeffekt
elektro- chemisch	Ionenleitfähigkeit
nukleartechnisch	Hochtemperaturfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Strahlungsresistenz

**Tabelle 9:** Technische Gliederung und relevante Eigenschaften von Keramik

## 5.3 Mechanische Eigenschaften

### 5.3.1 Dichte

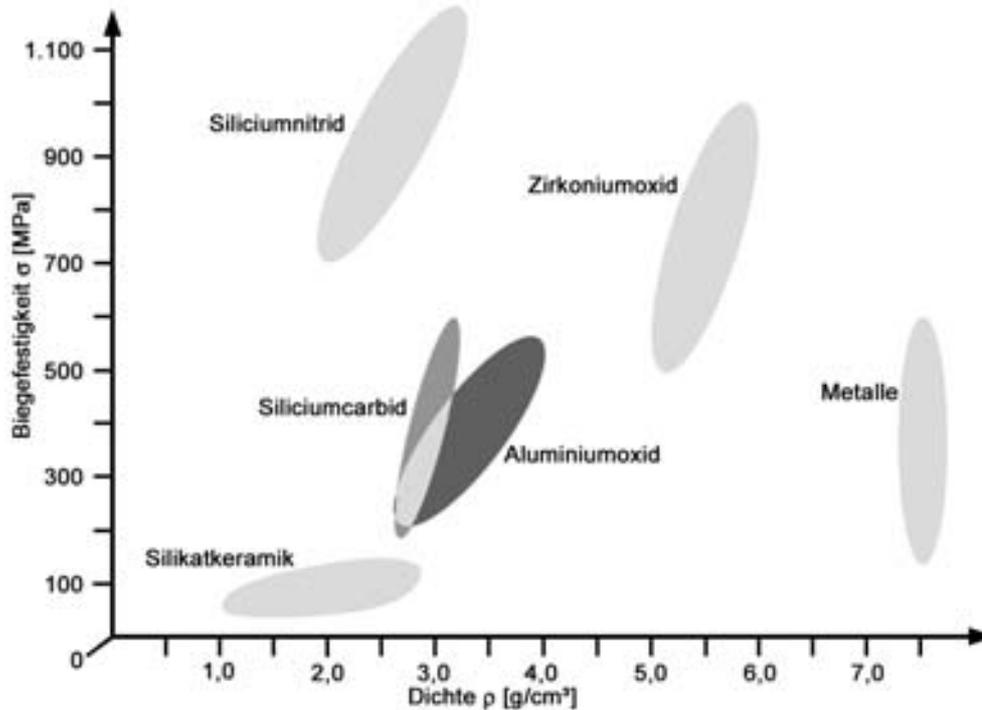
Die **Dichte**  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>] von Technischer Keramik beträgt 20 bis 70 % der Dichte von Stahl. Damit sind Möglichkeiten zur Massereduzierung gegeben, was z. B. für bewegte Teile im Maschinenbau von Vorteil ist.

Die relative Dichte  $d$  [%] beeinflusst die Eigenschaften der Keramiken wesentlich. Deshalb kann es z. B. für mechanische Anwendungen wichtig sein, eine Dichte nahe der jeweiligen theoretischen Dichte ohne Dichtegradienten zu erreichen, um möglichst gute mechanische Eigenschaften zu erzielen.

Im Gegensatz dazu können sich geringe relative Dichten, die auf einer gleichförmigen Porosität beruhen, z. B. positiv auf die Temperaturwechselbeständigkeit auswirken.

## Eigenschaften

Prüfverfahren zur Bestimmung von Dichte und Porosität sind in DIN EN 1 389, DIN EN 623-2 und DIN EN 60 672-2 festgelegt.



**Bild 81:** Orientierungsfelder Biegefestigkeit und Dichte von ausgesuchten Werkstoffen

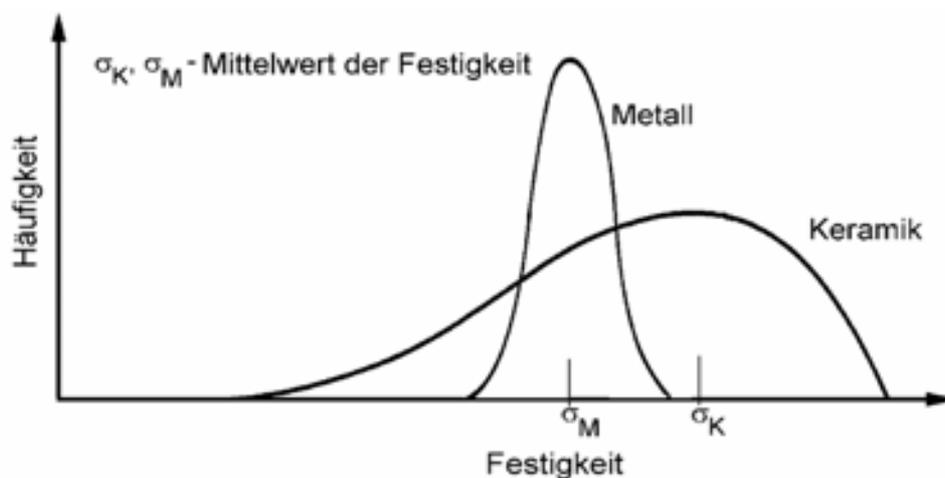
### 5.3.2 Porosität

In der Regel besitzen die Werkstoffe der Technischen Keramik keine offene **Porosität** und sind somit gasdicht. Bei einigen Werkstoffen ist die Porosität jedoch gewünscht, da dadurch z. B. thermische Belastungen besser beherrschbar sind oder große Oberflächen benötigt werden. Durch Rohstoffauswahl, den Herstellungsprozess und ggf. Zuschlagsstoffe kann die Porosität gezielt erzeugt werden. Damit sind geschlossene und offene Poren in unterschiedlichen Größen von einigen nm bis zu einigen  $\mu\text{m}$  möglich.

Prüfverfahren zur Bestimmung der Porosität sind in DIN EN 623-2 festgelegt.

### 5.3.3 Festigkeit

Die Kenngrößen **keramischer Werkstoffe für die Festigkeit**  $\sigma$  [MPa]<sup>12</sup> streuen **statistisch** in Abhängigkeit von der Werkstoffzusammensetzung, der Korngröße der Ausgangs- und Zusatzmaterialien, den Fertigungsbedingungen und dem Herstellverfahrens. Nach dem so genannten **weakest-link-Modell** entscheiden die hierdurch bedingte Defektverteilung und der so genannte kritische Defekt (Fehlstelle) über die Zuverlässigkeit des Bauteils. Deshalb ist die Streuung zwischen verschiedenen Chargen größer als diejenige innerhalb einzelner Chargen.



**Bild 82:** Festigkeitsverteilung innerhalb von Chargen

#### 5.3.3.1 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit  $\sigma_B$  [MPa] ist die wichtigste Größe für die Abschätzung der Festigkeit und für die Dimensionierung von Bauteilen. In Werkstofftabellen sind an speziellen „Biegebruchstäbchen“ mittels 3- oder 4-Punkt-Verfahren<sup>13</sup> ermittelte Werte zu finden, wobei der Wert des 3-Punkt-Biegeversuchs etwa 30 % über dem der 4-Punktbiegung liegt. In **Deutschland** ist die Angabe von Werten nach dem **4-Punkt-**Verfahren üblich. Oft wird aber der Vergleich von Daten durch das Fehlen von Angabe über die verwendete Meßmethode erschwert.

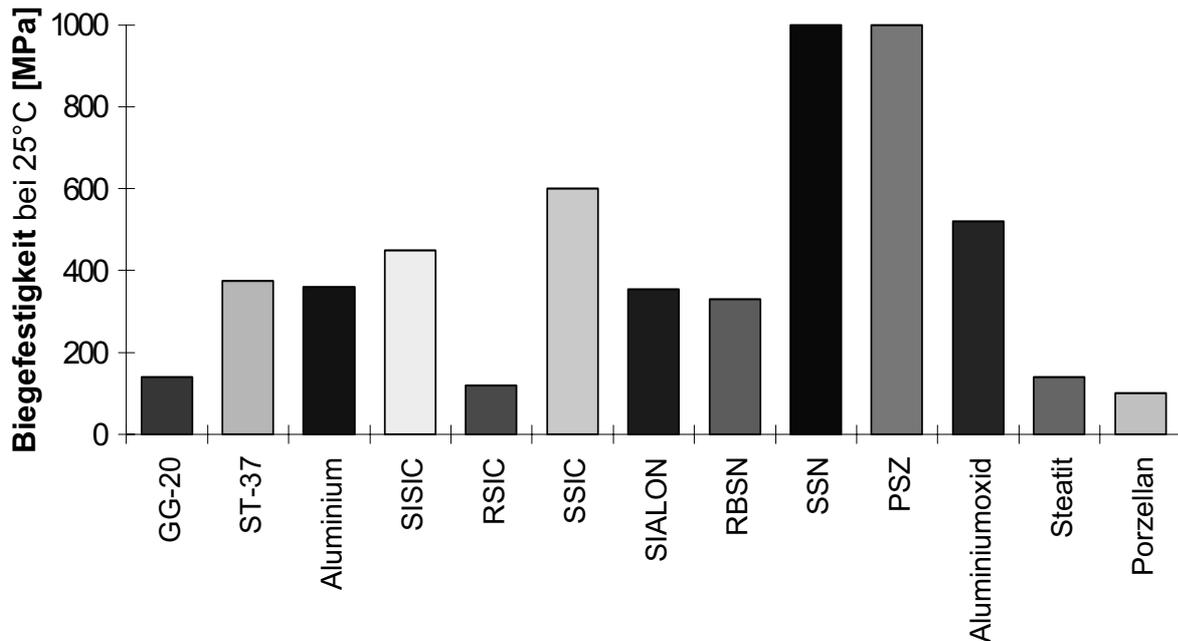
<sup>12</sup> Siehe auch S. 226ff. und 239ff.

<sup>13</sup> Die Beschreibung der Prüfverfahren finden sich auf S. 226ff.

## Eigenschaften

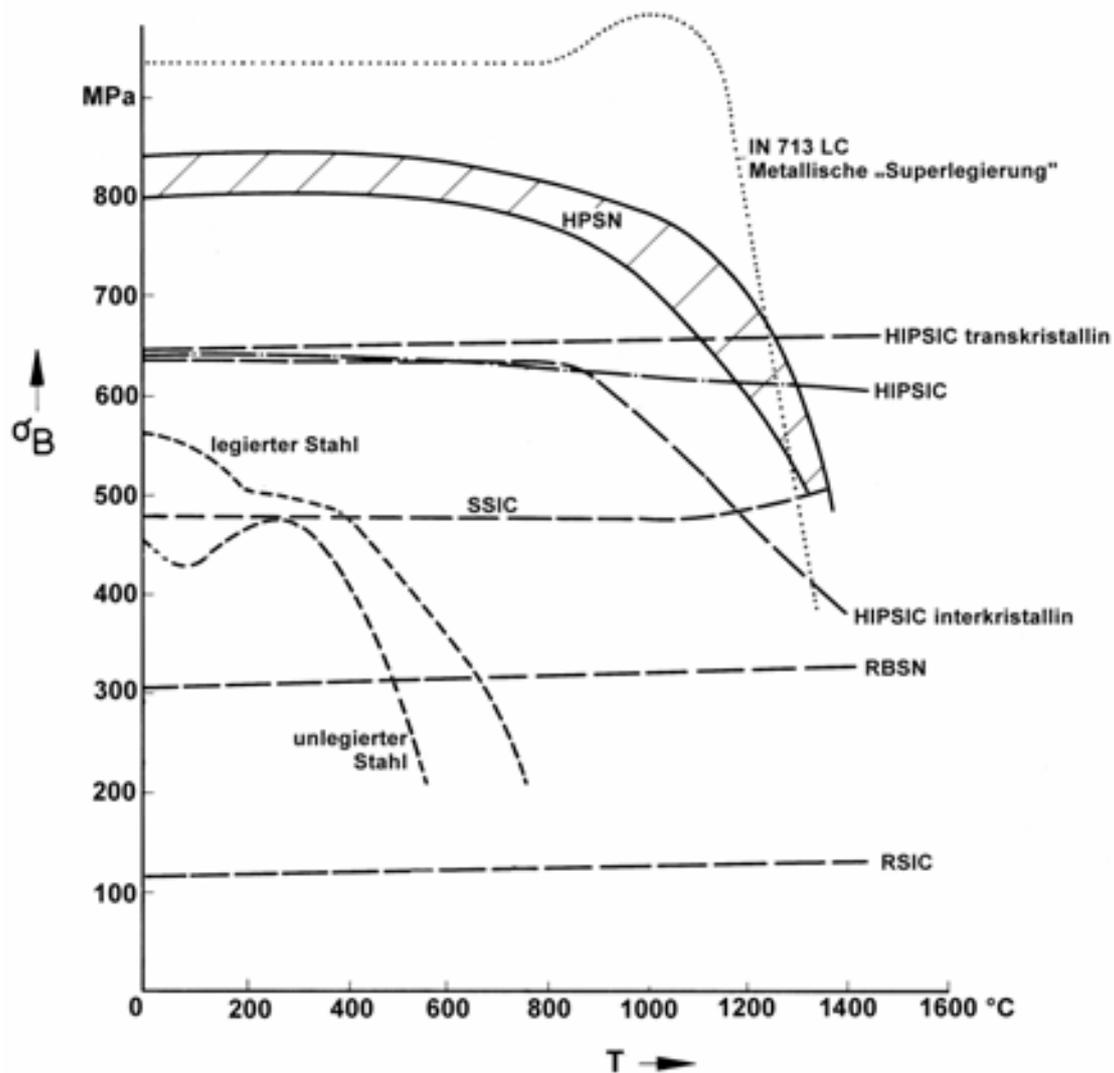
Die Werte der Biegefestigkeit am Bauteil werden durch Größe, Form, Oberfläche („as fired“, geschliffen etc.) und ggf. durch herstellungsbedingte Gefügeheterogenitäten beeinflusst.

Prüfverfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit sind in DIN EN 843-1, DIN EN 820-1 und DIN EN 60 672-2 festgelegt.



**Bild 83:** Biegefestigkeit ausgesuchter Werkstoffe

Technische Keramik zeichnet sich durch sehr gute Festigkeit bei hohen Temperaturen (Hochtemperaturfestigkeit) aus, die bei entsprechend hoher **Arbeitstemperatur** auch diejenige metallischer *Superlegierungen* übertrifft. Dadurch sind keramische Werkstoffe für den Einsatz bei Hochtemperaturprozessen prädestiniert (siehe Bild 84).



**Bild 84:** Einfluss der Temperatur auf die Biegefestigkeit

### 5.3.3.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Keramik beträgt das **5- bis 10-fache** der Biegefestigkeit. Gefügeinhomogenitäten spielen hier eine untergeordnete Rolle. Deshalb sollte Keramik vorzugsweise auf Druck belastet werden.

### 5.3.3.3 Zugfestigkeit

Die geringe Zugfestigkeit, die oft weniger als **20 %** der Biegefestigkeit beträgt, und das Spröbruchverhalten (siehe Bild 80) von Keramik erfordern das Vermeiden oder Minimieren von Zugspannungen bzw. eine möglichst genaue Berechnung der Spannungsverteilung. Das schließt nicht aus, dass z. B. Bauteile wie Freileitungsisolatoren für die

Hochspannungsenergieübertragung erfolgreich „nicht keramikgerecht“ als zugbelastete Teile eingesetzt werden.

### 5.3.3.4 Weibull-Modul

Mit einer von Weibull entwickelten Theorie, die auf dem Konzept des Versagens aufgrund des schwächsten Gliedes beruht, lässt sich das Streuverhalten der Festigkeit keramischer Materialien mathematisch gut beschreiben. Eine wichtige Voraussetzung dabei ist, dass das Versagensverhalten durch einen einzigen „Fehlertyp“ (Gefügeheterogenität) bestimmt wird. Weibull wählte zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens eine spezielle Form der Extremwertverteilung, die später nach ihm benannte Weibull-Verteilung.

Damit ergibt sich bei Kenntnis der Verteilungsparameter ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Belastung und der Bruchwahrscheinlichkeit. Außerdem geht das Festigkeitsniveau bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2 % ( $\sigma_0$ ) ein und der **Weibull-Modul m** ist damit ein Maß für die Festigkeitsstreuung. Je höher der Weibull-Modul liegt, umso homogener ist der Werkstoff (d. h., die „Defekte“ sind sehr gleichmäßig über das gesamte Volumen verteilt) und umso enger die Verteilungskurve der Festigkeitsstreuung. Heute liegen üblicherweise erzielbare Werte zwischen  $10 < m < 20$ . Die Bestimmung dieser Werte erfolgt bei keramischen Werkstoffen meist im Vierpunkt-Biegeversuch, da Zugversuche an Proben aus diesen Werkstoffen äußerst aufwändig sind.

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right\}$$

F = Ausfallwahrscheinlichkeit       $\sigma$  = Spannung

$\sigma_u$  = minimale Festigkeit      m = Weibull-Modul

$\sigma_0$  = Lageparameter der Weibull-Verteilung, Festigkeit bei 63,2 % Ausfallwahrscheinlichkeit; spielt bei der Weibull-Verteilung diejenige Rolle, die bei der Normalverteilung der Mittelwert spielt. Üblicherweise wird  $\sigma_u = 0$  gesetzt.

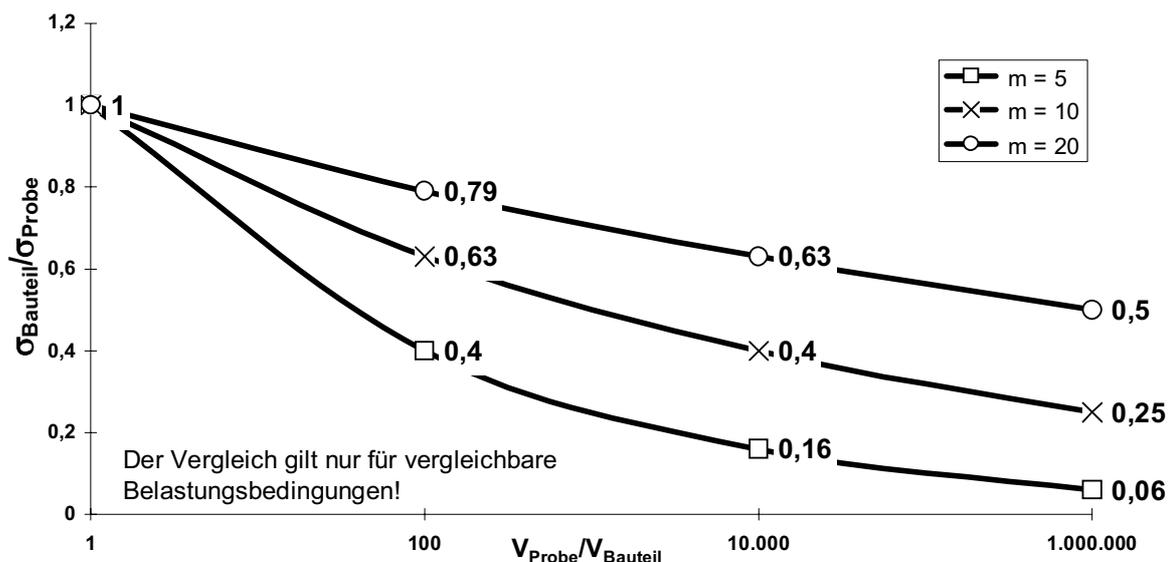
Da die Anzahl der möglichen Fehlstellen in der Keramik vom Bauteilvolumen abhängt, ist bei Berechnungen das belastete Volumen zu

berücksichtigen. Die Festigkeit liegt deshalb bei größeren Bauteilen unter den an Prüfkörpern gemessenen Werten. Aber auch bei großen, belasteten Bauteilvolumen ergibt ein größerer Weibull-Modul eine höhere Belastbarkeit. Nach der Weibull-Statistik ergibt sich über die Volumenrelation folgende Bauteilfestigkeit:

$$\sigma_{\text{Bauteil}} = \sigma_{\text{Probe}} * (V_{\text{Probe}} / V_{\text{Bauteil}})^{1/m}$$

Für das Volumen des Bauteils ist hierbei das unter Beanspruchung stehende Volumen einzusetzen, und die Belastungsart muss identisch sein (z. B.  $\sigma_{\text{Zug}}$  oder  $\sigma_{4\text{PB}}$ ). Für Druckbelastungen (Druckspannungen) gilt dieser Zusammenhang nicht!

Prüfverfahren zur Bestimmung des Weibull-Moduls sind in DIN EN 843-5 und DIN 51 110-3 festgelegt.



**Bild 85:** Zusammenhang zwischen Bauteilgröße und Festigkeit bei unterschiedlichem Weibull-Modul m

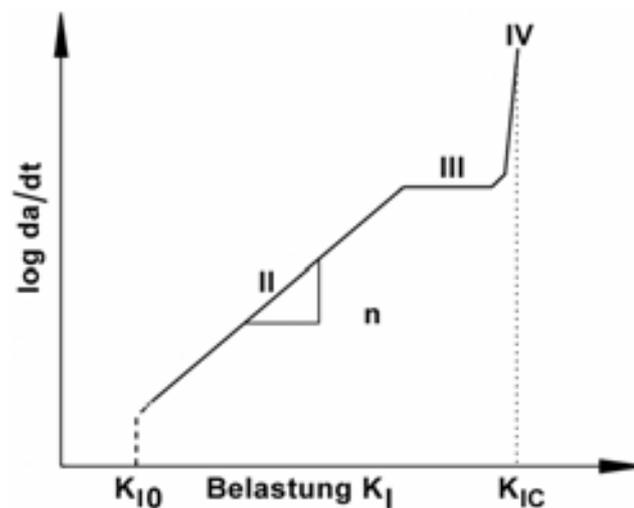
## Eigenschaften

Effektives Volumen	Zulässige Biegespannung [MPa]			
	Keramik 1	Keramik 2	Keramik 3	Keramik 4
$V_{\text{Bauteil}}/V_{\text{Probe}}$				
1 : 1	400 (m = 10)	300 (m = 10)	250 (m = 20)	200 (m = 30)
10 : 1	252 (63 %)	237 (79 %)	210 (84 %)	186 (94 %)
100 : 1	160 (40 %)	189 (63 %)	197 (79 %)	172 (86 %)
Werkstoff	Neuer Hochleistungswerkstoff	Aluminiumoxid silicium-infiltriertes Siliciumcarbid	-	-
Anmerkung	Prozess nicht ausgereift	<b>Stand der Technik</b>	Aktuelle Spitzentechnik	Wunsch des Konstrukteurs

**Tabelle 10:** Relativierung von Bauteil- und Probenfestigkeit für unterschiedliche Festigkeitsstreuung (Weibull-Modul m)

### 5.3.3.5 Spannungsintensitätsfaktor

Keramische Werkstoffe brechen spröde. Eine duktile Deformation wie bei Metallen ist nur bei Temperaturen nahe der Erweichungstemperatur möglich. Zur Beurteilung des Verhaltens spröder Werkstoffe in Bezug auf Rissverlängerung ist im Rahmen der Bruchmechanik der **Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$**  herausgearbeitet worden.



**Bild 86:** Belastungsdiagramm von Technischer Keramik

Der **kritische Spannungsintensitätsfaktor**  $K_{IC}$  [ $\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ ] ist ein Maß für die Rissanfälligkeit bzw. die Sprödigkeit eines Werkstoffes (Risszähigkeit). Das Risswachstumsverhalten ist nicht alleine von der Belastung abhängig, sondern von einer Kombination aus Belastung und Rissgröße. Erst wenn der kritische Wert  $K_{IC}$  erreicht ist, tritt Versagen auf.

$K_{IC}$  ist im Wesentlichen das Produkt der durch äußere Kräfte hervorgerufenen, senkrecht zur Rissebene wirkenden Spannung  $\sigma$  und der Wurzel der Ausdehnung des gefährlichsten Risses, der Risstiefe  $a$ . Darüber hinaus hängt er von der Geometrie des Bauteils und des Risses und somit von einer Korrekturfunktion  $Y$  ab.

$$K = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot Y \leq K_{IC}$$

Vereinfacht lässt sich feststellen, dass Werkstoffe mit hohem  $K_{IC}$ -Wert (z. B. SN oder Zirkoniumoxid PZT  $\rightarrow K_{IC} = \text{bis } 10,5$ ) der Rissfortpflanzung einen hohen Widerstand entgegensetzen.

## 5.3.4 Elastische Eigenschaften

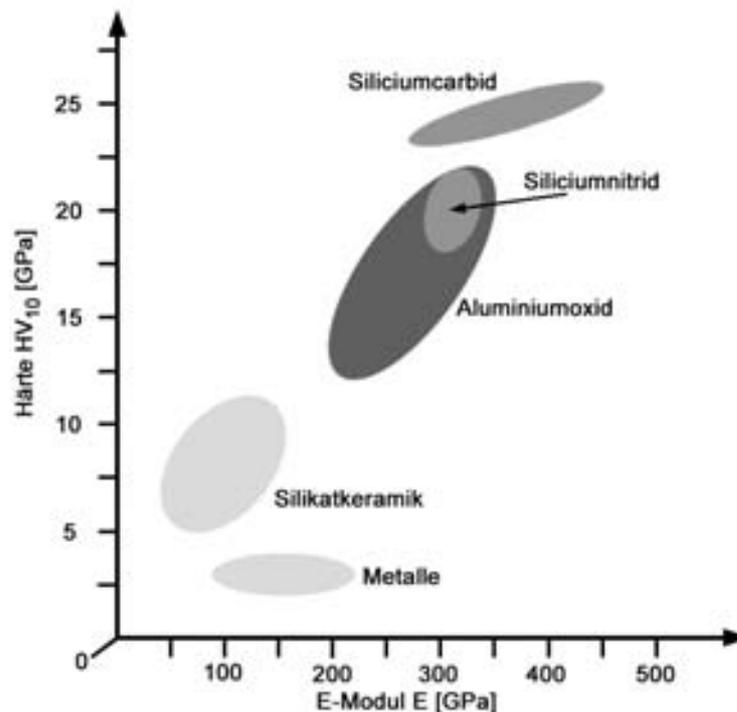
### 5.3.4.1 E-Modul

Der **Elastizitätsmodul**  $E$  [GPa] ist bei fast allen Oxid- und Nichtoxidkeramiken im Vergleich zu Stahl durchweg höher. Damit treten bei Keramikteilen unter gleicher Belastung nur ca. 50 bis 70 % der elastischen Dehnung gegenüber Stahlbauteilen auf. Die große Steifigkeit bedeutet jedoch für Keramik/Metall-Verbundkonstruktionen, dass bei Beanspruchung die Kräfte vorwiegend von der Keramik aufgenommen werden.

Prüfverfahren<sup>14</sup> zur Bestimmung des E-Modul sind in DIN EN 843-2 und DIN EN 60 672-2 festgelegt.

---

<sup>14</sup> Siehe auch Anhang, S. 230 (Härteprüfung und Ultraschallprüfung).



**Bild 87:** Orientierungsfelder Härte und E-Modul von ausgetesteten Werkstoffen

### 5.3.4.2 Querkontraktion

Die Querkontraktion  $\nu$ , oft auch Poisson-Konstante genannt, gibt das Verhältnis der (negativen) Querdehnung  $\varepsilon_2$  zur Längendehnung  $\varepsilon_1$  wieder, als Formel ausgedrückt,  $\nu = -\varepsilon_2 / \varepsilon_1$  oder mit  $\varepsilon_2 = -\nu \cdot \varepsilon_1 = -\nu \cdot \sigma / E$  gilt  $\nu = -E \cdot \varepsilon_2 / \sigma$ .

Die Werte für Keramiken liegen etwa im Bereich  $\nu \approx 0,18 - 0,3$ .

### 5.3.4.3 Schubmodul

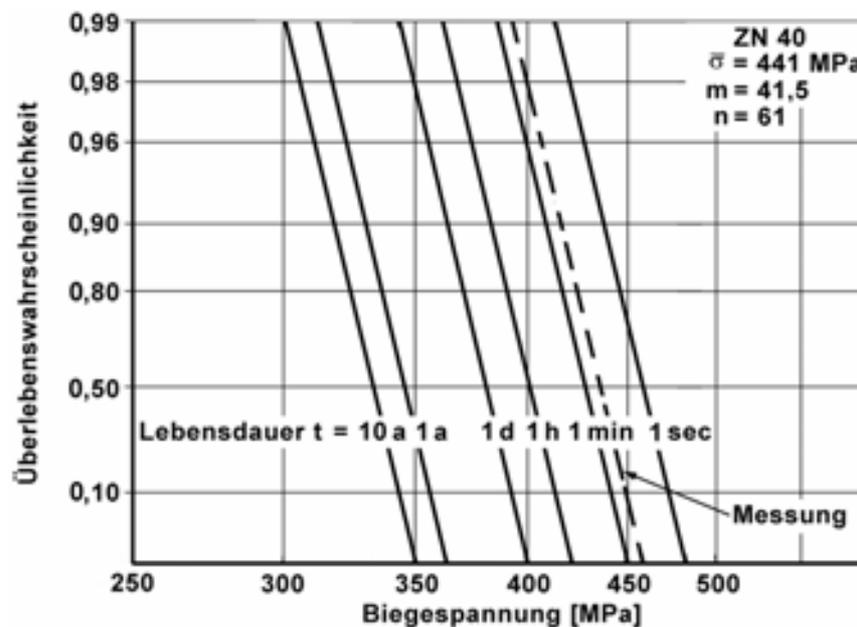
Der Schubmodul  $G$  ist die spezifische Formänderung für reine Scherung und allseitigen Druck oder als Formel ausgedrückt,  $G = \tau / \gamma$  ( $\tau$  = Schubspannung,  $\gamma$  = Schubwinkel).

Er kann für Keramik mit etwa 1/3 des E-Moduls berechnet werden.

### 5.3.4.4 Risswachstum

Ein keramisches Bauteil muss nicht nur bezüglich der maximalen Belastung, sondern auch für eine bestimmte Betriebszeit ausgelegt werden.

Hierzu sind auch Kenntnisse über das Festigkeit/Zeit-Verhalten von Keramiken notwendig. Das Versagen geht in der Regel von Einzel Fehlern aus, die (häufig) an oder in der Nähe der Oberfläche liegen, da hier meist die höchsten Spannungen auftreten. Wird das Bauteil unterhalb seiner Festigkeit belastet, und ist eventuell noch Wasser oder feuchte Luft als Umgebungsmedium vorhanden, so wächst, ausgehend von einem kritischen Fehler, erst sehr langsam und dann bei weiterer Belastung immer schneller ein Riss, bis das Bauteil letztendlich versagt. Dieses Verhalten wird als **unterkritisches Risswachstum** (URW = Spannungsrisskorrosion) bezeichnet. Es tritt vorwiegend bei Oxidkeramiken auf, aber auch bei nichtoxidischen Keramiken, die eine amorphe oxidische Korngrenzenphase besitzen. Mit den Methoden der „Linear-Elastischen Bruchmechanik“ (LEBM) kann das Risswachstumsverhalten der meisten Hochleistungskeramiken gut beschrieben werden.



**Bild 88:** SPT-Diagramm für Zirkoniumoxid

Unter Einbezug des unterkritischen Risswachstums kann bei keramischen Werkstoffen der Zusammenhang zwischen Festigkeit (Strength), Überlebenswahrscheinlichkeit (Probability) und Lebensdauer (Time) durch das so genannte SPT-Diagramm dargestellt werden.

Prüfverfahren zur Bestimmung der Parameter des unterkritischen Risswachstums sind in DIN EN 843-3 festgelegt.

### 5.3.4.5 Kriechverhalten

Im Zeitabstandsversuch werden bei den metallischen Werkstoffen plastische Verformungen unter statischer Belastung untersucht. Kriechvorgänge treten verstärkt bei hohen Temperaturen auf und begrenzen die Einsatzmöglichkeiten metallischer Werkstoffe. Die Kriechneigung von keramischen Werkstoffen ist unterhalb von 1.000 °C im Allgemeinen sehr gering. Anders als bei metallischen Werkstoffen können aber schon Kriechdehnungen von wenigen Prozent zum Versagen des Werkstoffs führen. Im Unterschied zum langsamen Risswachstum, wo sich ein singulärer Riss ausbreitet, versteht man unter dem Begriff der Kriechschädigung die Entstehung von Kriechporosität und Mikrorissen. Sie bewirken im Werkstoff eine relativ homogen verteilte, im gesamten belasteten Volumen anzutreffende Schädigung. Als Folge verändern sich die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs.

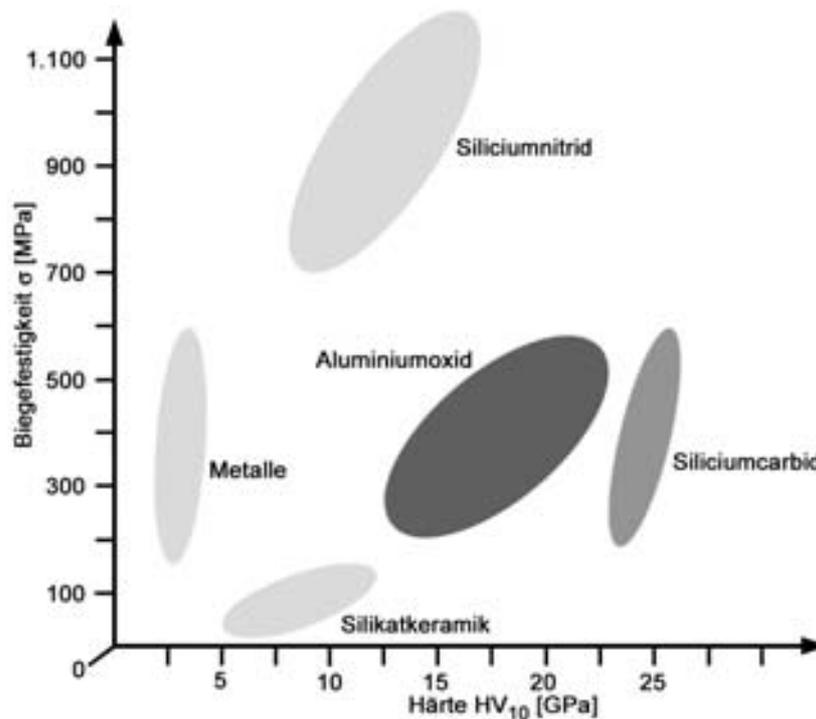
Auf das Kriechverhalten keramischer Werkstoffe nehmen neben der Belastung vor allem die chemische Bindung und die Gefügecharakteristik (Korngröße, Kornform, Porosität, Korngrenzphase) Einfluss.

Prüfverfahren zur Bestimmung der Parameter der Kriechverformung bei erhöhten Temperaturen sind in DIN ENV 820-4 festgelegt.

### 5.3.5 Härte

Härte zeichnet sich durch ihren großen Widerstand gegen Verformung aus, was durch einen großen E-Modul deutlich wird. Teile aus Technischer Keramik zeichnen sich daher durch ihre Steifigkeit und Formstabilität aus.

Die große **Härte** der Technischen Keramik führt zu günstigem Verschleißwiderstand. Technische Keramik ist damit gut für tribotechnische Aufgabenstellungen geeignet, wobei Werkstoff und Gefügestruktur die Verschleißbeständigkeit beeinflussen.



**Bild 89:** Orientierungsfelder Biegefestigkeit und Härte von aus-  
gesuchten Werkstoffen

Als Preis für die Härte besitzen keramische Werkstoffe kein plastisches Formänderungsvermögen (Duktilität) zum Abbau von Spannungsspitzen. Das Bauteil bricht ohne Vorankündigung (siehe Bild 80).

Prüfverfahren<sup>15</sup> zur Bestimmung der Härte nach Vickers, Knoop und Rockwell sind in DIN EN 843-4 festgelegt. Üblich ist die Angabe der **Vickers-Härte HV** [MPa], wobei wegen der Lastabhängigkeit die Angabe der Last wichtig ist. Beispielsweise unterscheiden sich die Werte von HV<sub>0,1</sub> und HV<sub>50</sub> um ca. 30 %.

Die Angabe von HV<sub>10</sub>-Werten hat sich in der Praxis für Keramik als sinnvoll erwiesen.

<sup>15</sup> Siehe auch Anhang, S. 209.

## 5.4 Thermische Eigenschaften

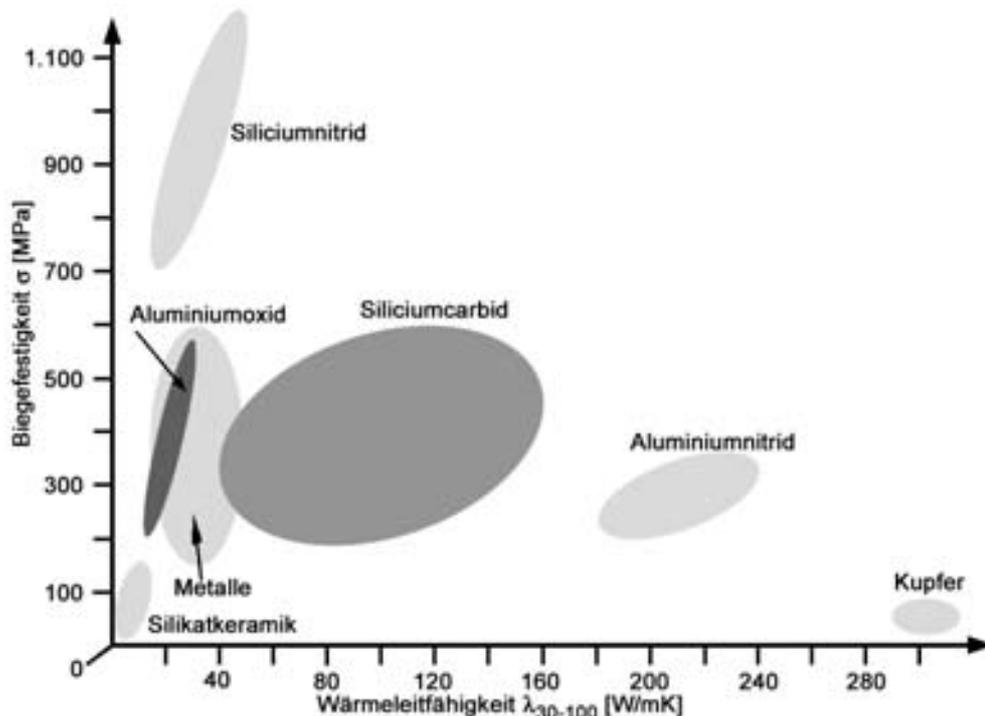
### 5.4.1 Wärmeleitfähigkeit

Die **Wärmeleitfähigkeit**  $\lambda$  [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] von Keramik ist im Allgemeinen niedriger als die von Metallen wie z. B. Stahl oder Kupfer. Werkstoffe wie Siliciumcarbid und Aluminiumnitrid werden jedoch wegen ihrer für Keramik relativ hohen Wärmeleitfähigkeit als elektrischer Isolierwerkstoff für Wärmeleit Zwecke eingesetzt.

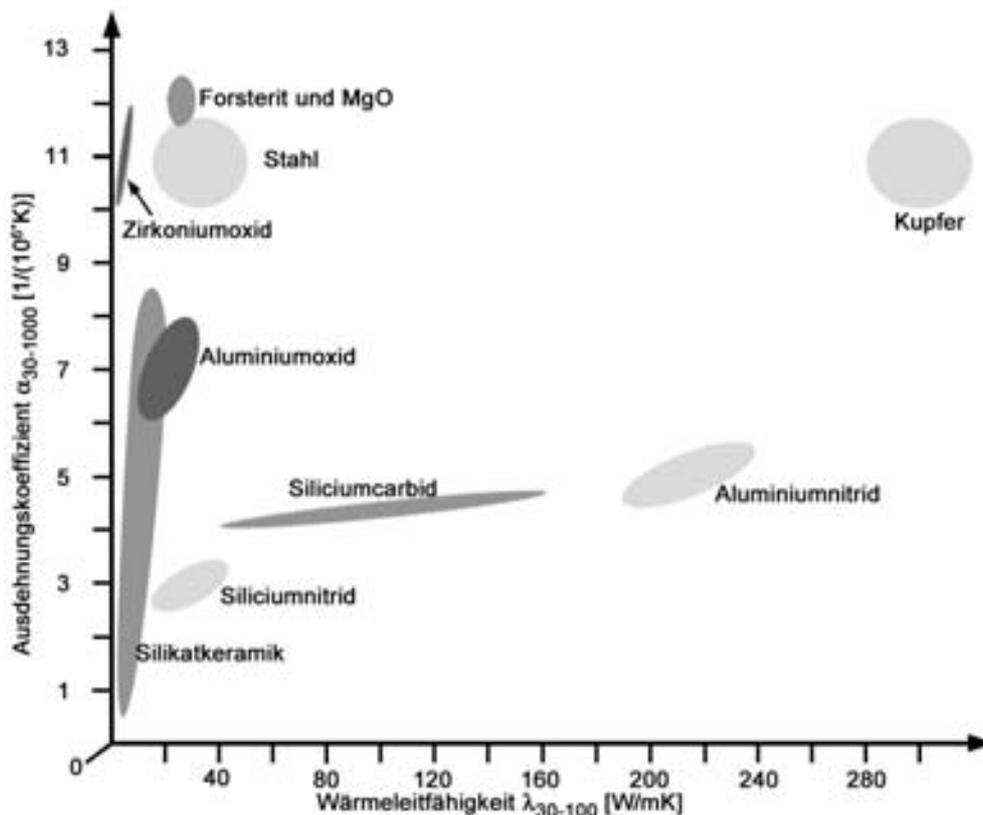
Andere keramische Werkstoffe werden dagegen wegen ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit als thermischer Isolierstoff eingesetzt. Diese Isoliereigenschaften können durch Porosierung der Keramik verstärkt werden. Ähnliche Wirkung haben Keramikfasermatten.

Beim Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von unterschiedlichen Werkstoffen ist auf die Angabe des Temperaturbereichs zu achten, z. B.  $\lambda_{30-100}$  für die Angabe 30 bis 100 °C.

Prüfverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sind in DIN EN 821-2 festgelegt.



**Bild 90:** Orientierungsfelder Biegefestigkeit und Wärmeleitfähigkeit von ausgesuchten Werkstoffen



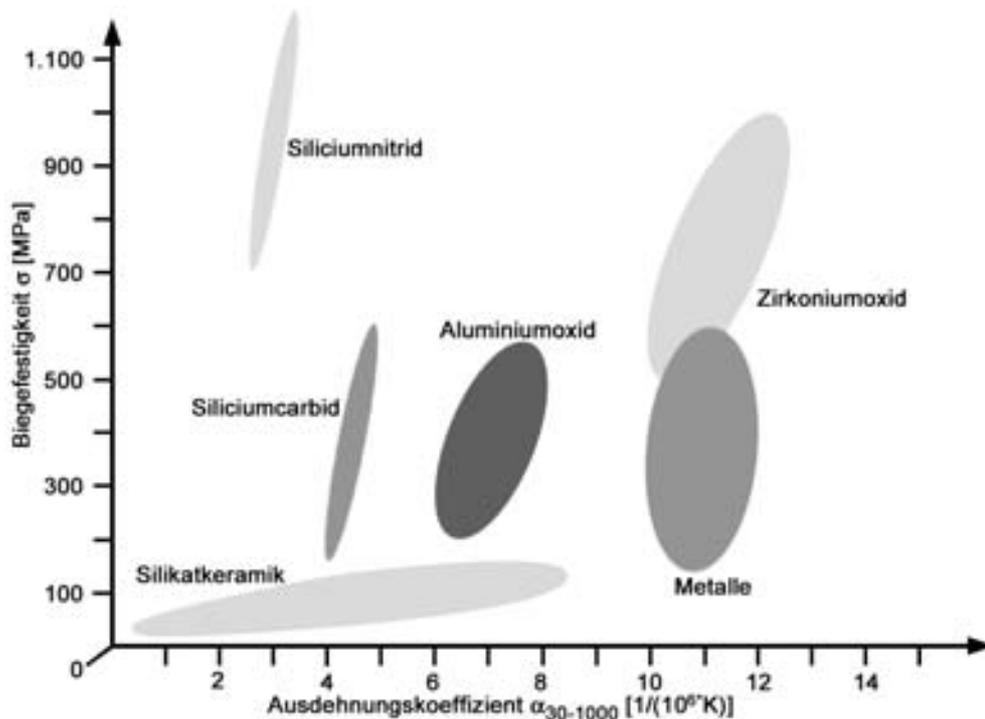
**Bild 91:** Orientierungsfelder Ausdehnungskoeffizient und Wärmeleitfähigkeit von ausgesuchten Werkstoffen

## 5.4.2 Längen-Ausdehnungskoeffizient

Die thermische **Längenausdehnung (AK)**  $\alpha$  [ $10^{-6}K^{-1}$ ] ist – außer bei Zirkoniumoxid, Forsterit und MgO – bei der Technischen Keramik typischerweise geringer als bei Stahl oder Grauguss. Dies ist bei Verbundkonstruktionen zu berücksichtigen.

Beim Vergleich der Längenausdehnung von unterschiedlichen Werkstoffen ist auf die Angabe des Temperaturbereichs zu achten, z. B.  $\alpha_{30-100}$  für die Angabe 30 bis 100 °C.

Prüfverfahren zur Bestimmung der thermischen Längenausdehnung sind in DIN EN 821-1 und DIN EN 60 672-2 festgelegt.



**Bild 92:** Orientierungsfelder Biegefestigkeit und Ausdehnungskoeffizient von ausgesuchten Werkstoffen

### 5.4.3 Temperaturwechselbeständigkeit

Eine große Anzahl keramischer Werkstoffe ist thermoschockempfindlich, d. h. plötzliche Temperaturänderungen können zum Versagen führen. Bemerkenswerte Ausnahmen sind Aluminiumtitanat, Quarzglas und auf Cordierit basierende Werkstoffe.

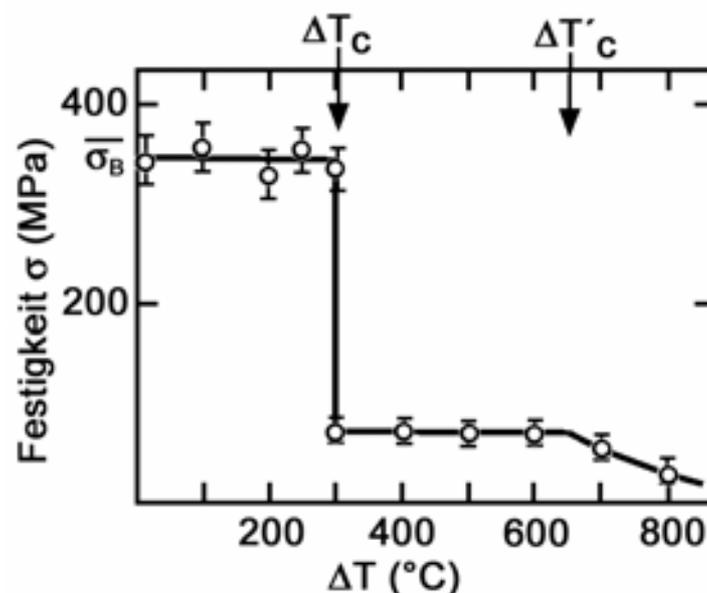
Ursache für die Thermoschockempfindlichkeit sind die durch Temperaturgradienten induzierten inneren mechanischen Spannungen und die hohe Sprödigkeit der Keramik. Während bei Metallen hohe lokale Temperaturspannungen lediglich eine geringe lokale plastische Verformung zur Folge haben, können diese Spannungen bei keramischen Werkstoffen Risswachstum auslösen. Deshalb sind schnelle, starke Temperaturwechsel möglichst zu vermeiden.

Die für die Temperaturwechselbeständigkeit verantwortlichen Thermo-  
spannungen hängen ab von:

- **Geometrischen Randbedingungen**
- **Thermischen Randbedingungen**
- **Physikalischen Größen, wie z. B.**

Wärmedehnungskoeffizient	$\alpha$
Elastizitätsmodul	$E$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$
Festigkeit	$\sigma$
und weitere	

Die Ermittlung der Thermoschockempfindlichkeit kann nach einer von Hasselmann vorgeschlagenen Methode erfolgen. Proben – im einfachsten Fall Biegestäbchen – werden von einer Temperatur  $T_0$  auf eine Temperatur  $T_u$  abgeschreckt. Nach dem Abschrecken wird die Festigkeit der Proben gemessen. Die Festigkeit in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_0 - T_u$  ergibt den in Bild 93 aufgezeichneten Verlauf. Bis zur Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$  ändert sich das Festigkeitsverhalten nicht. Dann fällt die Festigkeit innerhalb eines engen Bereichs von  $\Delta T$  stark ab. Bis zu  $\Delta T_c'$  bleibt diese reduzierte Festigkeit konstant und fällt dann bei größeren Temperaturdifferenzen weiter ab.



**Bild 93:** Festigkeit von thermogeschockten Biegeproben nach Hasselmann

## Eigenschaften

---

In der Literatur findet man zur Charakterisierung der Temperaturwechselbeständigkeit so genannte R-Werte ( $R_S$  = Thermoschockbeständigkeit).

$$R_S = (\lambda * \overline{\sigma_B}) / (\alpha * E)$$

mit:  $\overline{\sigma_B}$  = mittlere Biegebruchfestigkeit  
 $\alpha$  = thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 $E$  = E-Modul  
 $\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit

Die dort aufgeführten Werte für das Thermoschockverhalten müssen als grobe Anhaltspunkte für verschiedene Werkstoffe gelten, da die individuellen physikalischen und mechanischen Daten stark schwanken können. Neben den oben genannten Hauptgrößen gehen weitere, wie z. B. Bruchzähigkeit  $K_{IC}$  und spezifische Wärmekapazität  $C_p$  ein.

Für poröse Keramik sind Werte, die aus homogenem Material abgeleitet sind, nur bedingt übertragbar.

In der Praxis spielt auch die Geometrie eine wichtige Rolle. Deshalb haben wir in unseren Werkstofftabellen eine qualitative Bewertung eingeführt.

Prüfverfahren zur Bestimmung der Temperaturwechselbeständigkeit sind in DIN V ENV 820-3 festgelegt.

## 5.5 Elektrische Eigenschaften

Prüfverfahren zur Bestimmung elektrischer Eigenschaften sind in DIN EN 60 672-2 festgelegt.

### 5.5.1 Elektrischer Widerstand

Technische Keramik verfügt zumeist über einen hohen spezifischen **elektrischen Widerstand** von typisch  $\rho = 10^{11} \Omega\text{m}$ , verbunden mit einer hohen **Durchschlagsfestigkeit**, typisch  $E_d > 10 \text{ kV/mm}$ , zum Teil auch bei hohen Temperaturen (siehe S. 262–273); Ausnahme: SiC, B<sub>4</sub>C und Sonderwerkstoffe).

Prüfverfahren zur Bestimmung des elektrischen Widerstands sind in DIN prEN 50359-1-2 festgelegt.

## 5.5.2 Permittivitätszahl

Die **Permittivitätszahl** Technischer Keramik ist im Allgemeinen klein ( $6 < \epsilon_R < 12$ ), d. h., es tritt geringe elektrische Polarisation auf. Werkstoffe der Gruppe C 300 können  $350 > \epsilon_R > 3.000$  (vgl. Tabelle 38, S. 265) aufweisen und werden zur Herstellung von Kondensatoren verwendet. Die Kapazität eines Kondensators berechnet sich nach der Formel:

$$C = \epsilon_0 * \epsilon_r * F / d$$

mit: C = Kapazität  
 $\epsilon_0$  = Permittivität des Vakuums  
 $\epsilon_r$  = relative Permittivität  
 F = Kondensatorfläche  
 d = Plattenabstand

## 5.5.3 Dielektrischer Verlustfaktor

Die **dielektrischen Verluste** sind gering. Verantwortlich hierfür ist die Ionenpolarisation, die mit steigender Frequenz abnimmt. Bei höheren Temperaturen nimmt der **dielektrische Verlustfaktor**  $\tan \delta$  vor allem bei niedrigen Frequenzen zu. Es können aber auch keramische Materialien mit hohen Verlustfaktoren hergestellt werden.

$$\tan \delta = P_W / P = P_W / (U * I)$$

mit:  $P_W$  = Wirkverlust

## 5.6 Korrosion

Unter Korrosion versteht man die Reaktion eines Werkstoffs mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung dieses Werkstoffs bewirkt und zu einem Korrosionsschaden führen kann (DIN 50 900). Der Begriff

## Eigenschaften

---

Korrosion wurde ursprünglich nur auf Metalle angewendet, umfasst aber heute grundsätzlich alle Werkstoffe, also auch Polymere, Glas und Keramik.

Korrosion beschreibt den chemischen Angriff eines Mediums auf einen Werkstoff. Dagegen ist Verschleiß durch den mechanischen Angriff eines festen Körpers (Gegenkörper) auf den Grundkörper eines tribologischen Systems definiert. In den meisten Fällen verstärkt Korrosion möglichen Verschleiß.

Im Vergleich zu Metallen gelten keramische Werkstoffe als korrosionsbeständig, weil ihre Korrosionsraten deutlich niedriger sind als die von Metallen. Zwischen den Werkstoffgruppen (Silikat-, Oxid- und Nichtoxidkeramik) und auch zwischen den einzelnen Werkstoffklassen bestehen deutliche Unterschiede im Korrosionsverhalten und in der Korrosionsbeständigkeit. Während die Korrosion bei Metallen ein elektrochemischer Vorgang ist, bestimmt bei der Keramik die Löslichkeit des Materials die Höhe der Korrosion. Entscheidend für niedrige Korrosionsbeträge sind die chemische Zusammensetzung und die Mikrostruktur.

### 5.6.1 Korrosionsmechanismen

Für die Charakterisierung von Korrosionsprozessen bei anorganischen Werkstoffen sind folgende Korrosionsformen in Betracht zu ziehen:

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Flächenkorrosion:</b>         | Der korrosive Abtrag erfolgt gleichmäßig.  |
| <b>Selektive Korrosion:</b>      | Es werden leicht lösliche Bestandteile aus dem Werkstoffverbund herausgelöst.                |
| <b>Fehlstellenkorrosion:</b>     | Angriffspunkte sind hier Fehlstellen in den Oberflächen (Verunreinigungen, Risse, Poren...). |
| <b>Intergranulare Korrosion:</b> | Der korrosive Angriff erfolgt entlang der Korngrenzen.                                       |

#### 5.6.1.1 Flächenkorrosion und selektive Korrosion

Der von der Oberfläche ausgehende Abbau des Materials durch aggressive Medien setzt einen isotropen Aufbau der Werkstoffe (wie bei Gläsern) voraus. Die Geschwindigkeit des Korrosionsprozesses ist

dabei vom Löslichkeitsprodukt abhängig.<sup>16</sup> Keramische Werkstoffe weisen jedoch meist ein heterogenes Gefüge auf, das einen flächigen chemischen Angriff verhindert.

Bei Keramiken mit sehr hohem Glasphasenanteil gilt dies nicht. Deshalb besitzen korrosionsbeständige Porzellane wie Laborporzellan eine säurefeste Glasphase. Kritisch ist bei diesen Werkstoffen allerdings die Anwendung in alkalischen Medien.

### 5.6.1.2 Fehlstellenkorrosion

Fehlstellenkorrosion kann praktisch bei allen Keramiken auftreten. Handelt es sich um kleine Fehlstellen, so sind diese nicht schadensrelevant.

#### Beispiel:

Aluminiumoxide (99,5 %) enthalten als typische Additive geringe Anteile von  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und häufig  $\text{MgO}$ .  $\text{Na}_2\text{O}$  und  $\text{MgO}$  bilden mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wenige kleine, auf das Bauteil verteilte einzelne Kristallite der Zusammensetzung  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  (Spinell) bzw.  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ). Ein Korrosionsangriff ist unkritisch, da Reaktionen nur direkt an der Oberfläche stattfinden.

Das Herauslösen von größeren Inhomogenitäten bewirkt deutliche Schädigungen der Oberfläche. Im Endstadium können daraus Tiefenschäden entstehen (vor allem zusammen mit intergranularer Korrosion), die letztlich zu Bauteilversagen führen können.

### 5.6.1.3 Intergranulare Korrosion

Wesentlicher Korrosionsmechanismus ist hier das Herauslösen der glasigen/kristallinen, deutlich ausgeprägten Kornzwischenphase vor allem bei flüssigphasengesinterten Werkstoffen (LPS), wie LPSSIC, LPSN, LPBN und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit  $< 99,5\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt.

Die Korrosionsgeschwindigkeit ist abhängig vom Löslichkeitsprodukt  $L$  der die Korrosion bestimmenden Ionen der Zwischenphase.

Durch geeignete Zwischenphasen mit hohem Löslichkeitsprodukt oder der Vergrößerung der Gefügekörner, verbunden mit der Reduzierung der Korngrenzen, kann die intergranulare Korrosion weitgehend reduziert werden.

---

<sup>16</sup>  $L = [\text{K}^+][\text{A}^-]$  mit  $[\text{K}^+] =$  Konzentration der Kationen und  $[\text{A}^-] =$  Konzentration der Anionen

Trockenphasengesinterte Stoffe (S-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SSIC und SSN) und heißgepresste Werkstoffe (HP-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HPSIC etc.) zeigen praktisch keine Anfälligkeit für Korrosion.

### 5.6.2 Korrosionsarten

In der Praxis unterscheidet man drei Korrosionsarten:

- Korrosion in flüssiger Phase,
- Schmelzkorrosion und
- Korrosion durch Gase/Heißgaskorrosion.

#### 5.6.2.1 Korrosion in flüssiger Phase

Sie hat für Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau höchste Bedeutung.

##### 5.6.2.1.1 Säuren

Ähnlich wie Silikat- und Borsilikatgläser (Laborglas) besitzt Laborporzellan bei moderaten Temperaturen (bis ca. 100 °C) eine hohe Korrosionsfestigkeit.

Aluminiumoxide (von 92 % bis 99,5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt) sind gegen Mineralsäuren sehr beständig, wenn die **sekundäre Phase** (Korngrenzenzwischenphase) **säurebeständig** ist.

Neben hoch reinen Aluminiumoxiden besitzen hochreine Nichtoxidwerkstoffe die geringsten Korrosionsraten. Dies trifft vor allem auf die S- und HP-Materialien zu, die im Gegensatz zu den LPS-Werkstoffen **keine Korngrenzenzwischenphase** enthalten.

SISIC nimmt wegen seiner infiltrierten **säurebeständigen** Siliciumphase eine Sonderstellung ein.

Flusssäuren (HF) bzw. ihre Gemische mit konzentrierter H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und HNO<sub>3</sub> greifen alle Werkstoffe an, die SiO<sub>2</sub> enthalten. Lediglich hoch reine Aluminiumoxide (Reinheit > 99,9 %) und SSIC bzw. HPSIC sind resistent.

In der Regel wirken verdünnte Säuren stärker korrosiv als konzentrierte (Einfluss des pH-Werts).

### 5.6.2.1.2 Laugen und geschmolzene Alkalien

Wie Laborporzellan reagieren Aluminiumoxide mit geringerem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt wenig mit Laugen, korrodieren aber stark durch geschmolzene Alkalien. Hoch reine Oxide sind beständiger, reagieren aber deutlich mit Schmelzen. Das Aluminiumoxid löst sich dann auf und bildet Natriumaluminat ( $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ ).

Der Angriff von Laugen ist bei Nichtoxidkeramik etwas geringer ausgeprägt als bei  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Allerdings wird die Siliciumphase in SSIC deutlich angegriffen und gegenüber geschmolzenen Alkalien ist die Korrosionsbeständigkeit gering.

### 5.6.2.1.3 Wasser

Die hydrothermale Korrosion, d. h. Korrosion in Wasser bzw. Wasserdampf bei Temperaturen von  $> 100\text{ °C}$  und erhöhtem Druck, ist ein Sonderfall. Mit Ausnahme von SSIC, das in destilliertem Wasser einen schwachen Korrosionsangriff erkennen lässt, zeigen alle anderen Werkstoffe einen deutlichen Masseverlust, der mit steigender Temperatur zunimmt und verstärkt die Korngrenzphase auflöst. Bei  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kommt es ab  $220\text{ °C}$  auch zum Ablösen der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Matrix. Trinkwasser oder verdünnte Salzlösungen greifen alle Keramikwerkstoffe deutlich weniger an als destilliertes Wasser.

## 5.6.2.2 Korrosion durch Schmelzen

Die Korrosionsmechanismen von Keramik gegenüber anorganischen, nichtmetallischen Schmelzen (wie z. B. geschmolzenen Salzen, Oxiden, Schlacken und Gläsern) und Metallschmelzen weisen Unterschiede auf.

### 5.6.2.2.1 Nichtmetallische Schmelzen

Das Maß der Reaktion zwischen anorganischen Schmelzen und Keramik hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Die wichtigsten davon sind:

- Viskosität der Schmelze,
- Acidität oder Basicität der Schmelze,

## Eigenschaften

---

- Chemische Zusammensetzung und Löslichkeit der Reaktionsprodukte,
- Chemische Zusammensetzung der Haupt- und Nebenphasen der Keramik sowie
- Benetzbarkeit der Keramik durch die Schmelze.

Wenn die Beständigkeit von Keramik gegenüber Schmelzen gefordert wird, ist man in der Praxis fast immer auf Tests angewiesen.

### 5.6.2.2.2 Metallschmelzen

Im Gegensatz zu den Oxidkeramiken besitzen **Nichtoxidwerkstoffe** einen hohen Korrosionswiderstand gegenüber metallischen Schmelzen. **Siliciumnitrid** wird von den meisten Schmelzen nicht benetzt, ist aber in oxidierender Atmosphäre nicht gegen Kupferschmelzen beständig. Bornitrid ist gegen die meisten Metallschmelzen wegen seiner niedrigen Benetzbarkeit sehr resistent.

**Aluminiumtitanat** (ATI) besitzt, ebenfalls wegen seiner geringen Benetzbarkeit, eine hohe Beständigkeit vor allem gegenüber NE-Schmelzen.

### 5.6.2.3 Korrosion durch (Heiß-)Gase

Grundsätzlich sind alle **Oxidwerkstoffe** bis nahe ihrer Schmelztemperatur in *Luft* und *oxidierender Atmosphäre* beständig.

Alle **Nichtoxide** reagieren bei Temperaturen über 1.200 °C empfindlich gegen Sauerstoff. Viele Nichtoxide – vor allem SiC's – bilden bei Oxidation dichte Schutzschichten aus Siliciumdioxid, die vor weiterer Oxidation schützen. Bei Temperaturen oberhalb 1.420 °C nimmt die Korrosion deutlich zu.

Über das Korrosionsverhalten von Keramik gegenüber anderen Gasen (Cl<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> etc.) ist wenig bekannt.

Bestimmte Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Qualitäten sind gegen Cl<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> in hydrothermalen Atmosphäre resistent. Ebenso besitzt Cordierit in hydrothermalen Atmosphäre die geforderten Ansprüche hinsichtlich Heißgaskorrosion.

## 5.6.3 Bestimmung der Korrosion

### 5.6.3.1 Flüssigphasenkorrosion

#### 5.6.3.1.1 Prüfbedingungen

Zur Bestimmung der Flüssigphasenkorrosion sind keine genormten Prüfverfahren bekannt, obwohl die Versuchsanordnungen hierfür relativ einfach sind.

Zur Anwendung kommen:

- Auslagerung der Prüfkörper in den korrosiven Medien bei Raumtemperatur (Prüfzeit 10 bis 100 Tage),
- Auslagerung der Prüfkörper unter Rückflusskühlung bei höheren Temperaturen (Prüfzeit 5 bis 50 Tage) und
- Auslagerung in Autoklaven bei höherer Temperatur und Druck (Prüfzeit 1 bis 5 Tage).

Bei anschließender Anwendung des Penetrationstests ergeben sich bei den ersten beiden Methoden nach etwa einer Woche erste Aussagen.

#### 5.6.3.1.2 Bestimmung der Korrosionshöhe

##### **Penetrationstest**

Nach der Auslagerung wird die gewaschene und getrocknete Probe in eine Farbstofflösung getaucht. Die Stärke der Färbung ist ein Maß für die Korrosionsstärke. An senkrecht zur Oberfläche geschnittenen Proben kann die Eindringtiefe bestimmt werden.

Liegen allerdings keine breiten Korngrenzenzwischenphasen vor, versagt diese Methode.

Ein negativer Penetrationstest allein gibt keine klare Aussage über die Korrosionsbeständigkeit eines Werkstoffs. Es sind weitere Untersuchungen notwendig.

##### **Dimensionsänderungen**

Die Bestimmung von Dimensionsänderungen, z. B. bei Wandstärken, ist anwendbar bei Flächenkorrosion, versagt aber bei intergranularer Korrosion.

### **Masseverluste $\Delta m$**

Die Bestimmung des Masseverlustes  $\Delta m$  in g, bezogen auf die Fläche des Bauteils, ist das meist angewandte Verfahren.  $\Delta m$ -Werte erlauben wegen der Korrosionsmechanismen,<sup>17</sup> keine quantitativen Aussagen über das Korrosionsverhalten von keramischen Bauteilen.

Bei keramischen Werkstoffen liegt in der Regel Korngrenzkorrosion vor. Ein Tiefenschaden – wie er z. B. im Penetrationstest sichtbar wird – ist dadurch nicht erkennbar. Dazu kommt, dass sich, wie z. B. bei  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 99,5\%$ , S- und HP-Werkstoffen, kaum ein deutlich messbarer Masseverlust zeigt. Deshalb sind auch Umrechnungen in Abtragsraten oder Lebensdauerberechnungen bei Technischer Keramik nur äußerst selten statthaft.

### **Biegefestigkeitsabnahme $\Delta\delta_B$**

Die Bestimmung der Biegefestigkeit (in Verbindung mit der Weibull-Statistik) erlaubt eine sichere Aussage über den Einfluss von Korrosionsprozessen auf das Festigkeitsverhalten und damit auf die Lebensdauer von keramischen Bauteilen.

### **Härteabnahme $\Delta H_V$**

Bei korrodierten Proben zeigt sich ein deutlicher Härteabfall. Die Messwerte schwanken aber so stark, dass daraus keine sichere Aussage ableitbar ist.

### **Verschleißfestigkeit**

Verschleißtests an korrodierten Proben erlauben Aussagen über die Lebensdauer von Bauteilen in korrosiven Medien. Angewendet werden adäquate Verschleißprüfungen.<sup>18</sup>

### **Mikroskopische und rastermikroskopische Untersuchungen**

An korrodierten Proben lassen sich Aussagen über den zeitlichen Ablauf von Korrosionsprozessen und dabei auftretenden Korrosionsmechanismen finden.

---

<sup>17</sup> Siehe Flächenkorrosion, S. 120 und Intergranulare Korrosion, S. 121

<sup>18</sup> Siehe Verschleißmessung in Modellsystemen, S. 135ff.

## **5.6.3.2 Schmelzkorrosion**

### **5.6.3.2.1 Prüfbedingungen**

Korrosionsprüfungen müssen immer realitäts- bzw. einsatzbezogen sein. Die relevanten Beanspruchungskriterien und das zu erwartende Verhalten des Werkstoffs in Wechselwirkung mit dem korrodierenden Medium bedürfen einer vorherigen Abschätzung.

Zu berücksichtigen sind dabei:

- thermische Beanspruchungen,
- chemische Aspekte,
- die Art des zu prüfenden Materials und
- mechanische Belastung.

### **5.6.3.2.2 Bestimmung der Korrosionshöhe**

Im Gegensatz zur Flüssigphasenkorrosion bestehen für die Prüfverfahren der Schmelzkorrosion nationale und internationale Normen.

Die wichtigsten dieser Normen sind:

- Randwinkelmessung im HT-Auflichtmikroskop,
- das Tiegelverschlackungsverfahren (DIN 51069-2),
- Aufstreu- und Aufklopffverfahren (ASTM C 768) und
- Eintauchverfahren (Fingertest) (ASTM C 874).

Zusammenfassend ist festzustellen:

Die Korrosion feuerfester Werkstoffe in flüssigen Schlacken und metallischen Schmelzen ist ein komplexer und deshalb schwer nachzuvollziehender Prozess. Standardisierte Prüfverfahren sind nur dann relevant, wenn sie die in der Praxis gültigen Bedingungen gut wiedergeben.

### **5.6.3.3 Heißgaskorrosion**

Nach Auslagerung der Werkstoffe bei definierten Gaskonzentrationen und Temperaturen lässt sich in der Regel die Höhe der Korrosion durch die mikroskopische Untersuchung der korrodierten Proben bestimmen.

Korrosiver Angriff von Gasen auch bei hohen Temperaturen lässt sich durch thermoanalytische Verfahren (z. B. Thermowaage) bestimmen.

### 5.6.4 Schlussbemerkung

Bei der Korrosionsprüfung erhält man oft unzureichende (wenn nicht gar falsche) Ergebnisse, wenn man nur eine Messmethode benutzt.

Die Messergebnisse der Korrosion (z. B. Masseverlust) können nicht unmittelbar in die veränderten Eigenschaften des korrodierten Bauteils umgerechnet werden, sondern müssen in der Regel wegen der unterschiedlichen Korrosionsarten direkt gemessen werden.

Intergranulare Korrosion ist bei keramischen Werkstoffen der wesentliche Korrosionsmechanismus. Die Diffusionsgeschwindigkeit des Mediums in der Keramik bestimmt die Korrosionsgeschwindigkeit. Daraus folgt, dass die Korrosionshöhe immer einem  $\sqrt{t}$ -Gesetz folgen sollte. Das Löslichkeitsprodukt bestimmt die Steigung der Korrosionsparabel.

Ist bei konstanten äußeren Korrosionsbedingungen der zeitliche Verlauf der gemessenen Eigenschaften nicht kontinuierlich, sondern geknickt, so ist dies ein Hinweis auf Sekundärprozesse oder allgemein auf wechselnde Korrosionsbedingungen im Bauteil (z. B. Schichtaufbau), die ggf. zusätzlich untersucht werden müssen.

## 5.7 Verschleiß

Verschleiß ist definiert als fortschreitender Materialverlust der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Er äußert sich im Auftreten von losgelösten kleinen Teilchen (Verschleißpartikeln) sowie in Stoff- und Formänderungen der tribologisch beanspruchten Oberfläche. Systematisch betrachtet ist der Verschleiß ein Element der Tribologie.

Verschleiß ist von hoher wirtschaftlicher Bedeutung, da von ihm die Standzeiten von Maschinen und Anlagen abhängen. Durch Keramik können hier wesentliche Verbesserungen erreicht werden, wie die Beispiele Wasserhahn mit Grund- und Regelscheibe oder Auskleidungen aus Aluminiumoxid zeigen. Weitere ausgewählte Anwendungsgebiete

sind die Umformtechnik, die Fertigbetonindustrie, die Textilindustrie, die Papierindustrie, die Zerspantechnik, der Pumpenbau sowie weite Bereiche der Chemie- und Verfahrenstechnik, wo z. B. Keramikarmaturen, Gleitringdichtungen und Düsen zum Einsatz kommen.

## 5.7.1 Tribologie

Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegungen. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten bzw. Gasen ein.

### 5.7.1.1 Reibung

Die dynamische Reibung beschreibt die Kraft, die der Relativbewegung entgegenwirkt. Als Kenngröße für translatorische Bewegungen wird die Reibungszahl  $\mu$  oder  $f$  angegeben, die das Verhältnis der Reibungskraft  $F_R$  zur Normalkraft  $F_N$  darstellt.

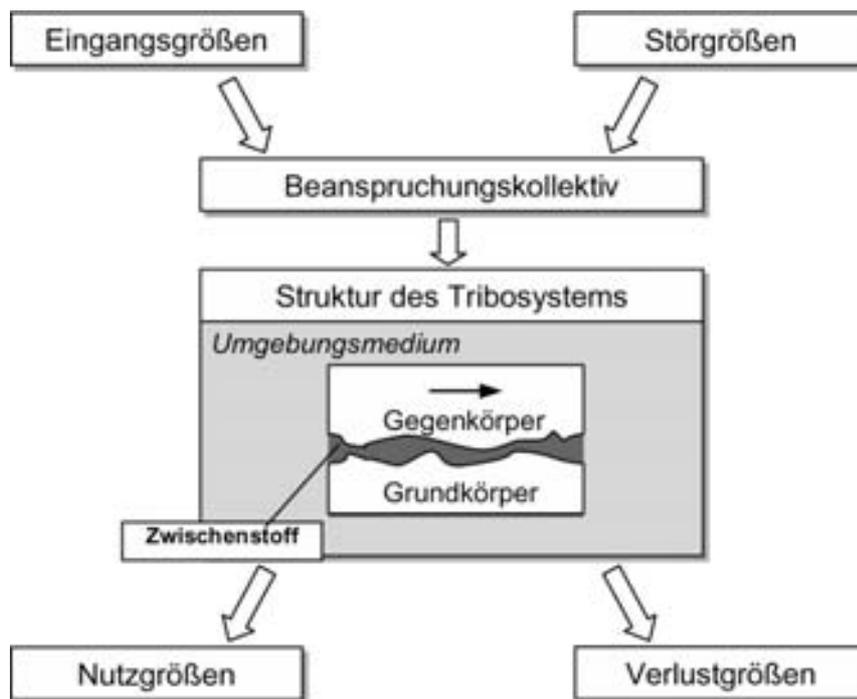
### 5.7.1.2 Tribosysteme

Im Allgemeinen werden Reibung und Verschleiß als Verlustgrößen tribologischer Systeme angesehen. Sie hängen nicht nur von den Materialeigenschaften ab, sondern auch von den auftretenden Wechselwirkungen und den Größen des Beanspruchungskollektivs. Schon kleine Veränderungen im System können sich unter Umständen in beträchtlichem Maße auf die Reibungszahl und den Verschleißbetrag auswirken.

**Reibung und Verschleiß sind deshalb Systemeigenschaften und keine reinen Werkstoffkennwerte!**

Ein Tribosystem besteht aus den vier Elementen: Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium. Diese bestimmen zusammen mit der Summe aller Beanspruchungen, die als Beanspruchungskollektiv bezeichnet wird, die Reibungszahl und das Verschleißverhalten sowie die Verschleißhöhe.

## Eigenschaften



**Bild 94:** Darstellung eines tribologischen Systems

Das Beanspruchungskollektiv wird aus den technisch-physikalischen Parametern Normalkraft  $F_N$ , Geschwindigkeit  $v$ , Temperatur  $T$  und Beanspruchungsdauer  $t_B$ , den Bewegungsformen und den zeitlichen Abläufen gebildet.

In der Praxis erfolgt eine Aufteilung der Tribosysteme in

- **geschlossene Tribosysteme**, wie Lager und Dichtungen, entsprechend Bild 94 und
- **offene Tribosysteme**, wie Rutschen, Rinnen und Rohrsysteme. Hierbei wird die Funktion des fehlenden Gegenkörpers vom Zwischenstoff übernommen.

Die Systemanalyse einer Tribologischen Reaktion wird in DIN 50 320 behandelt.

### 5.7.2 Verschleißarten

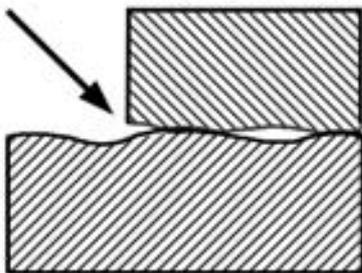
Die Verschleißarten erlauben eine in der Praxis übliche Aufgliederung nach der Beanspruchung. Geschlossene Tribosysteme u. a. sind durch Gleit-, Korngleit-, Roll-, Wälz-, Prall- und Schwingungverschleiß gekennzeichnet (siehe Tabelle 11). In offenen Tribosystemen treten vor

allem Prall-, Kavitations-, Furchungs-, Spül- und Strahlverschleiß auf (siehe Tabelle 12), wobei die beiden Letzteren auch Erosionsverschleiß genannt werden.

Es ist zu beachten, dass bei jedem Verschleißvorgang verschiedene Verschleißmechanismen wirksam werden können.

### 5.7.3 Verschleißmechanismen

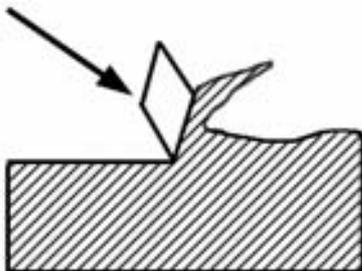
Die Verschleißmechanismen erlauben eine Gliederung nach den elementaren Grundvorgängen, welche sich durch das Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Elemente des tribologischen Systems ergeben. Nach dem heutigen Stand müssen vier voneinander verschiedene Hauptverschleißmechanismen unterschieden werden:



**Bild 95:**

**Adhäsion:**

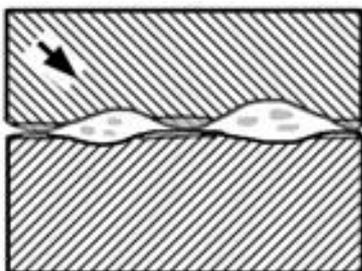
Ausbildung und Trennung von Grenzflächen (z. B. Kaltverschweißen)



**Bild 96:**

**Abrasion:**

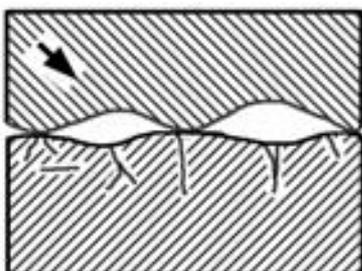
Materialabtrag durch ritzende Beanspruchung (Mikrospanen)



**Bild 97:**

**Tribochemische Reaktion:**

Entstehung von Reaktionsprodukten durch tribologische Beanspruchung bei chemischer Reaktion (z. B. Hotspots)



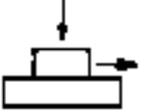
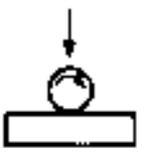
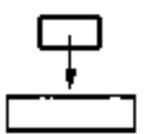
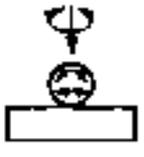
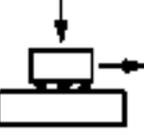
**Bild 98:**

**Oberflächenzerrüttung:**

Ermüdung und Rissbildung im Oberflächenbereich durch tribologische Wechselbeanspruchungen, die zu Materialtrennung führen

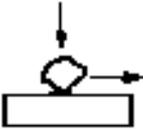
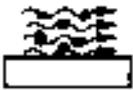
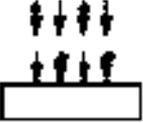
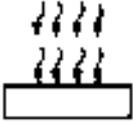
### 5.7.4 Beanspruchungen und deren Wirkung

In geschlossenen Tribosystemen treten Beanspruchungen entsprechend Tabelle 11 auf:

Beanspruchung	Verschleißart	Wirkender Mechanismus			
		Adhäsion	Abrasion	Oberflächen-zerrüttung	Tribochem. Reaktionen
	-			X	X
	Gleitverschleiß	X	X	X	X
	Rollverschleiß Wälzverschleiß	X	X	X	X
	Prallverschleiß Stoßverschleiß	X	X	X	X
	Schwingungsverschleiß	X	X	X	X
	Korngleiten			X	
	Kornwälzen			X	

**Tabelle 11:** Gliederung für geschlossene Tribosysteme nach Beanspruchung und Verschleißart

Offene Tribosysteme können durch folgende Beanspruchungen, Verschleißarten und wirkende Mechanismen beschrieben werden:

Beanspruchung	Verschleißart	Wirkender Mechanismus			
		Adhäsion	Abrasion	Oberflächen-zerrüttung	Tribochem. Reaktionen
	Furchungsverschleiß			X	
	Spülverschleiß (Erosionsverschleiß)		X	X	X
	(Gleit-)Strahlverschleiß		X	X	X
	Prallstrahlverschleiß		X	X	X
	Kavitationserosion			X	X
	Tropfenschlag			X	X

**Tabelle 12:** Gliederung für offene Tribosysteme nach Beanspruchung und Verschleißart

## Eigenschaften

Folgende Parameter haben Einfluss auf die Art und die Intensität des Verschleißes:

Elemente	Grundkörper	Härte, Duktilität, Festigkeit
	Gegenkörper	Härte, Duktilität, Festigkeit
	Zwischenstoff	Härte, Festigkeit, Kornform und Korngröße
	Medium	neutral, korrosiv
Beanspruchungskollektiv	Bewegungsart	gleitend, wälzend, stoßend
	Bewegungsablauf	kontinuierlich, oszillierend, intermittierend
	Relativgeschwindigkeit	
	Normalkraft, Druck	
	Kinetische Energie, Impuls	
	Temperatur	
	Zeit	

**Tabelle 13:** Einflüsse auf den Verschleiß

Weitere Informationen hierzu sind in Normen<sup>19</sup> oder der im Anhang angegebenen Literatur zu finden.

### 5.7.5 Verschleißmessgrößen

Die Verschleißmessgrößen kennzeichnen direkt oder indirekt die Änderung der Gestalt oder Masse eines Körpers durch den Verschleiß. Da die Messgrößen keine Werkstoff- sondern Systemkenngrößen darstellen, ist die Angabe von Zahlenwerten nur dann sinnvoll, wenn das Beanspruchungssystem und die Struktur des Tribosystems beschrieben ist. Anwendung finden folgende Verschleißmessgrößen:

**Linearer Verschleißbetrag:** Längenänderung zur verschleißenden Fläche.  
Zeichen:  $W_L$  Einheit: m

**Planimetrischer Verschleißbetrag:** Größe der Schnittfläche, die senkrecht zur verschleißenden Fläche abgetragen wird.  
Zeichen:  $W_q$  Einheit:  $m^2$

<sup>19</sup> Die Normen DIN 50 323-1 (1988), DIN 50 323-3 (1993), DIN 50 320 (1979) und DIN 50 321 (1979) sind beim Beuth-Verlag nicht mehr verfügbar.

<b>Volumetrischer Verschleißbetrag:</b>	Volumenänderung des verschlissenen Körpers (Volumenverschleiß) Zeichen: $W_V$ Einheit: $m^3$
<b>Verschleißmasse:</b>	Volumenänderung des verschlissenen Körpers (Masseverschleiß) Zeichen: $W_m$ Einheit: kg
<b>Relativer Verschleißbetrag:</b>	Verhältnis der Verschleißbeträge eines verschleißenden Körpers und eines unter gleichen Bedingungen verschleißenden Referenzkörpers Zeichen: $W_r$ Einheit: - oder %
<b>Verschleißwiderstand:</b>	Reziprokwert des Verschleißwertes Zeichen: $1/W$ Einheit: $m^{-1}$ , $m^{-2}$ , $m^{-3}$ , $kg^{-1}$

In der Praxis werden häufig Verknüpfungen des Verschleißbetrags mit einer Bezugsgröße benutzt. Typische Maßzahlen sind: Verschleißgeschwindigkeit, Verschleißintensität (Verschleiß/Weg-Verhältnis), Verschleiß/Durchsatzverhältnis, verschleißbedingte Gebrauchsdauer, verschleißbedingte Durchsatzmenge.

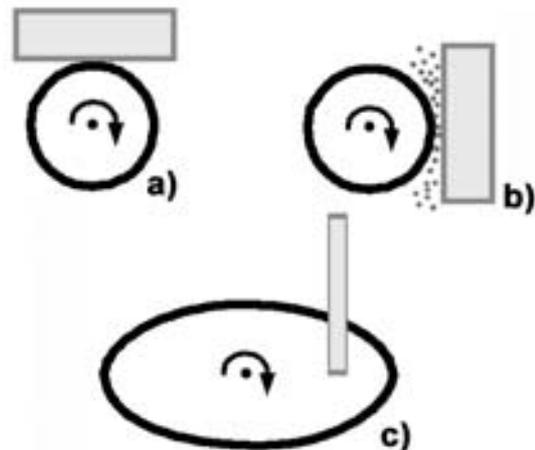
## 5.7.6 Spezielle Beispiele

### 5.7.6.1 Verschleißmessung in Modellsystemen

Zur Verschleißmessung werden u. a. die in Bild 99 skizzierten Messaufbauten Welle-Messkörper (a), Welle-Messkörper-Mahlgut (b) und Stift-Scheibe (c) verwendet.

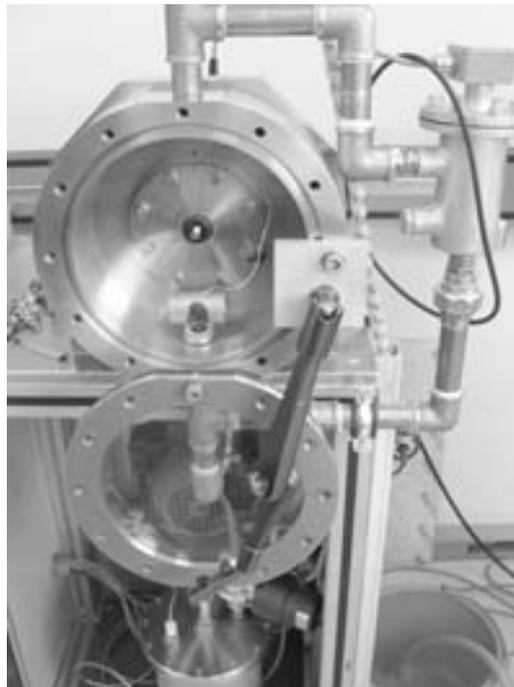
## Eigenschaften

---



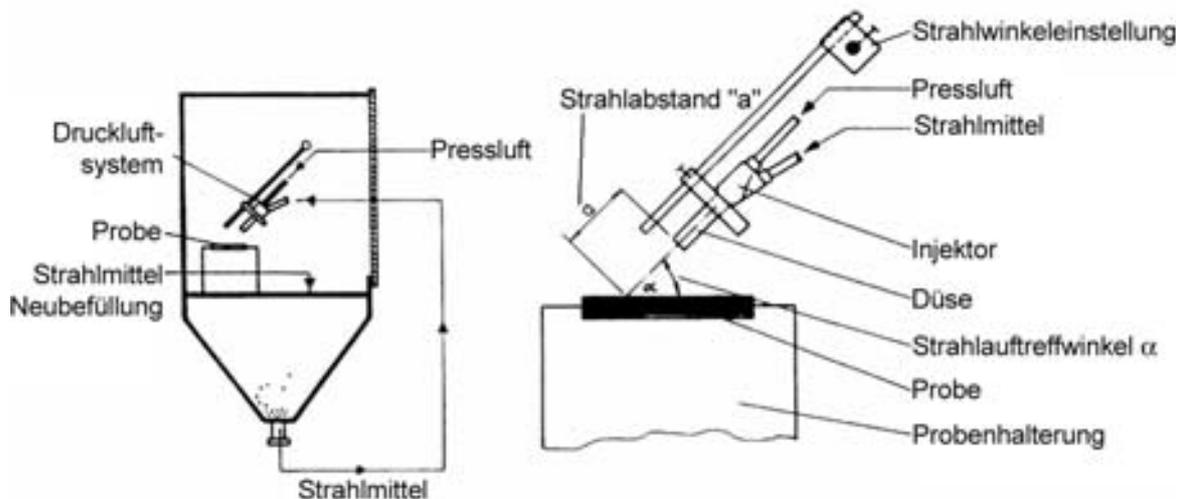
**Bild 99:** Messaufbauten zur Verschleißmessung

Mit dem abgebildeten Prüfstand für Gleitringdichtungen ist es möglich, unter Betriebsbedingungen Drehzahl, Temperatur und Drehmoment zu messen, wobei Drehzahl sowie Nass- und Trockenlauf variiert werden können.



**Bild 100:** Verschleißmessstand für Gleitringdichtungen

Der Strahlverschleiß in offenen Systemen lässt sich relativ einfach und schnell durch einen Strahltest im Werkstoffvergleich durchführen und eine Rangfolge der Werkstoffe bezüglich ihrer Verschleißbeständigkeit ermitteln.



**Bild 101:** Versuchsanordnung für Strahlverschleiß<sup>20</sup>

Strahlmittel, Strahlgeschwindigkeit und Strahlteilchengröße haben einen entscheidenden Einfluss auf die Messergebnisse.

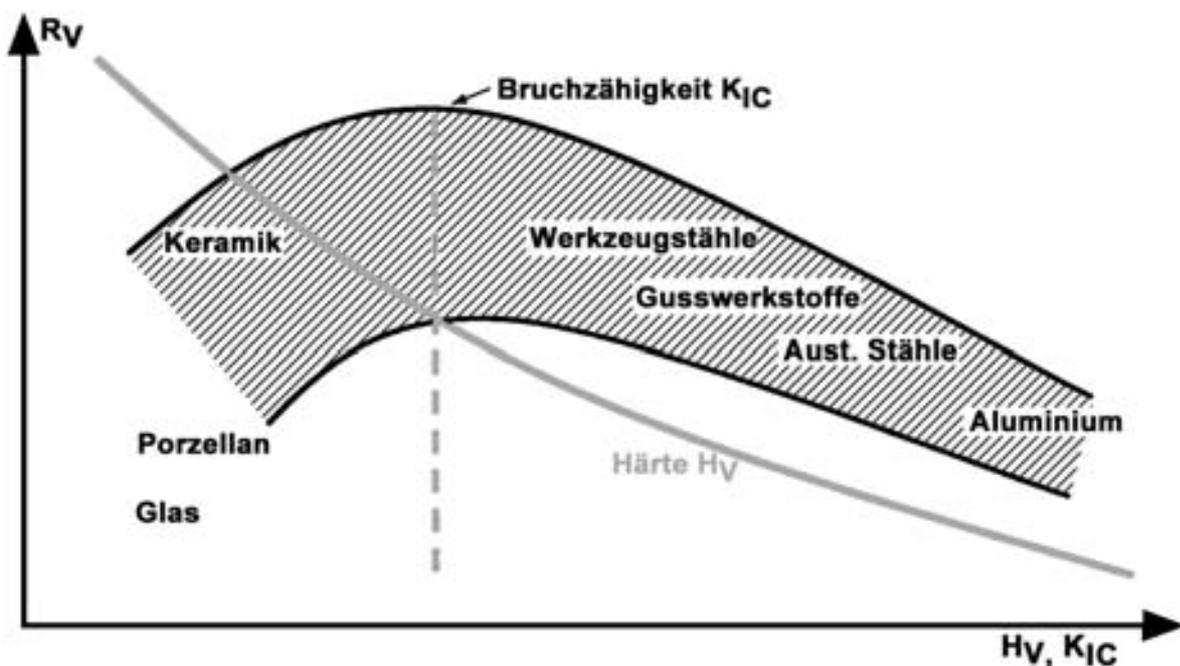
### 5.7.6.2 Verschleißschutz

Keramische Werkstoffe werden in hoch beanspruchten Tribosystemen wegen ihrer Verschleißfestigkeit eingesetzt. Voraussetzungen hierfür sind neben der hohen Härte Eigenschaften, wie hohe Steifigkeit (E-Modul), hohe Druckfestigkeit und hohe Bruchfestigkeit. Dies geht bei Keramik allerdings zulasten der Bruchzähigkeit. Weitere positive Eigenschaften der Keramik für den Einsatz in Tribosystemen sind ihre niedrige Dichte, geringe Wärmedehnung, Temperaturfestigkeit und Korrosionsfestigkeit.

Während bei Adhäsion und tribochemischer Reaktion das Verschleißverhalten weitgehend durch die chemischen und thermochemischen Eigenschaften der Schutzwerkstoffe bestimmt wird, beeinflussen bei den Verschleißmechanismen Adhäsion und Oberflächenzerrüttung die physikalischen Kennwerte Härte und Bruchzähigkeit die Verschleißfestigkeit. Dies wird in Bild 102 schematisch dargestellt.

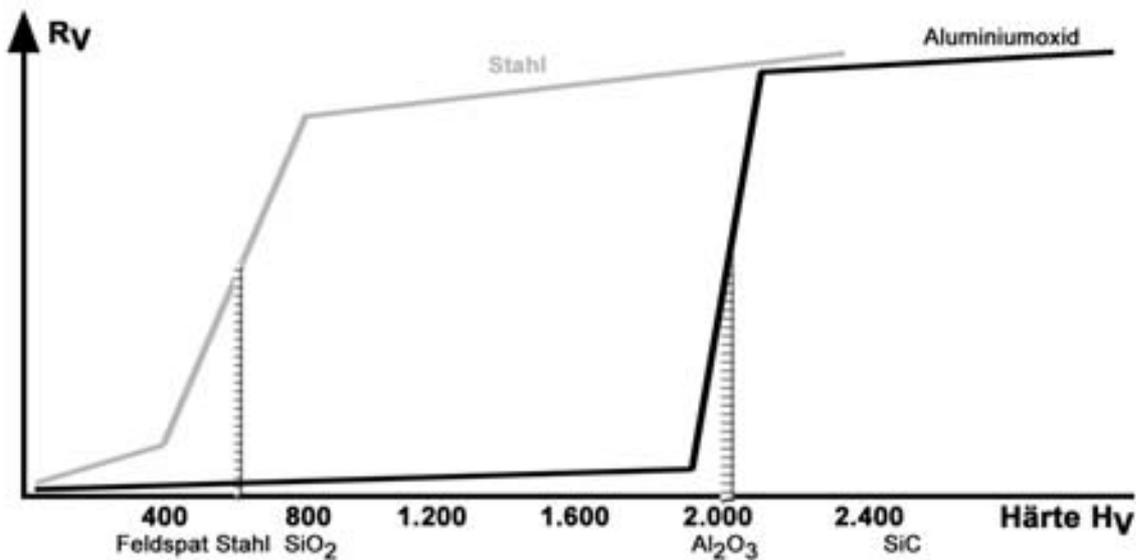
<sup>20</sup> Nach Norm DIN 50 332 (1979), bei Beuth-Verlag nicht mehr verfügbar.

## Eigenschaften



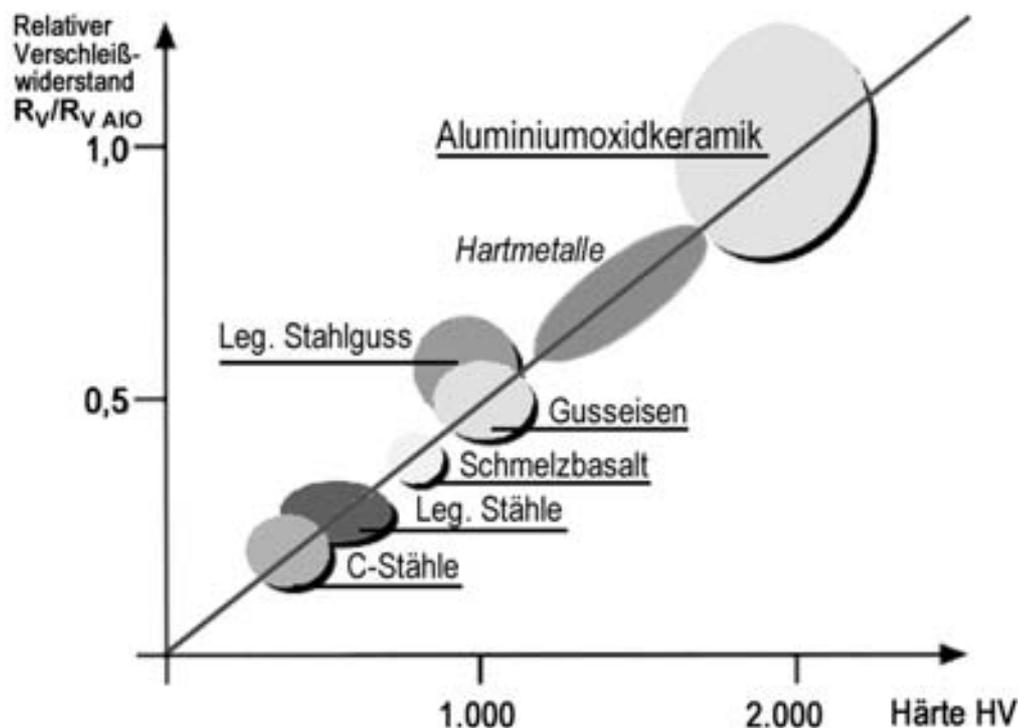
**Bild 102:** Abhängigkeit des Verschleißwiderstands  $R_V$  von Härte und Bruchzähigkeit, ermittelt in einem definierten Modellsystem

Die höchsten Verschleißwiderstände lassen sich demnach erreichen, wenn die optimale Kombination von Härte und Bruchzähigkeit im Verschleißschutzwerkstoff erreicht wird.



**Bild 103:** Verschleiß-Tieflage/Hochlage-Beziehung

Liegt reiner Abrasivverschleiß vor, kann die Verschleiß-Tieflage/Hochlage-Beziehung bei der Wahl des Grundkörpers hilfreich sein. Sie beruht auf der bekannten Mohsschen Härteskala: ein härteres Material ritzt ein weiches Material.



**Bild 104:** Einfluss der Härte auf den Verschleißwiderstand  $R_V$ , bezogen auf den Verschleißwiderstand von Aluminiumoxid  $R_{V \text{ AlO}_3}$

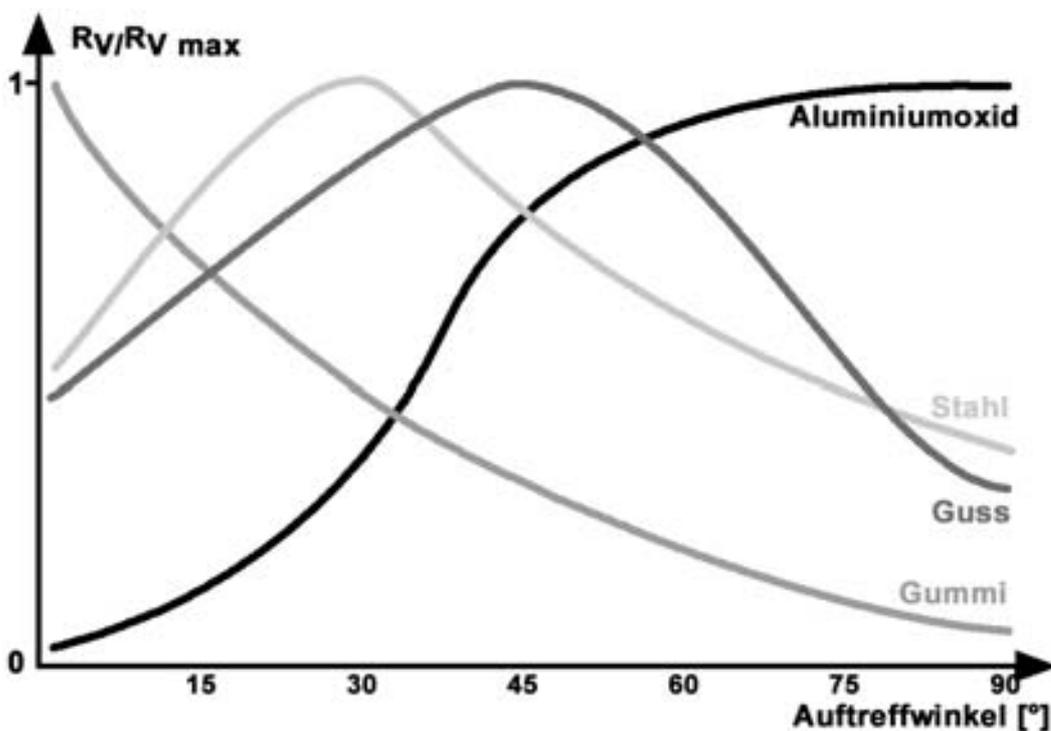
Bei keramischen Werkstoffen hat, wegen deren hoher Härte, Abrasion als Verschleißmechanismus nur untergeordnete Bedeutung.

Ebenso neigt Keramik wegen der hohen Gitterbindungskräfte (ionische und kovalente Bindung) nicht zu Kaltverschweißungen, wie sie bei Metallen auftreten. Adhäsion als Verschleißmechanismus ist weitgehend zu vernachlässigen.

Ebenso sind tribochemische Reaktionen beim Einsatz von Keramik relativ selten (treten immer auf, sind relativ klein). In geschlossenen Tribosystemen sind sie – vor allem bei Festkörper- und Mischreibung – nicht auszuschließen.

Dagegen ist Oberflächenzerrüttung sowohl in geschlossenen wie auch in offenen Tribosystemen der Hauptverschleißmechanismus bei den sprödkeramischen Werkstoffen.

Hervorgerufen wird diese durch hohe Beanspruchung mit hoher Normalkraft oder hoher kinetischer Energie. Beispielsweise folgt der Schrägstrahlverschleiß weitgehend der Funktion  $W_V = \frac{1}{2} m v^2 \cdot \sin^{1/2} \alpha$  mit  $\alpha$  = Auftreffwinkel. In Fördersystemen, z. B. Rohrbögen, Rohrweichen, Rohrverengungen und Düsen, mit Winkeln bis  $30^\circ$  hat sich deshalb Aluminiumoxid sehr gut bewährt, während bei großen Winkeln Gummi optimal ist.



**Bild 105:** Einfluss des Auftreffwinkels auf den Verschleißwiderstand  $R_v$ , bezogen auf den maximalen Verschleißwiderstand

### 5.7.6.3 Zerspanung

Zum Drehen, Fräsen und Bohren werden traditionell Hartmetallwerkzeuge eingesetzt. Diese konventionellen Schneidstoffe auf Metallbasis sind thermisch nur begrenzt belastbar und verschleifen. Sie werden daher typischerweise mit Kühlschmierstoffen versorgt.

Keramisch basierte Werkstoffe behalten ihre Festigkeit auch bei deutlich höheren Betriebstemperaturen. Diese neuen Werkstoffe erlauben damit höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten mit hoher Prozesssicherheit unter Wegfall von Kühlschmierstoffen, was nicht nur produktionstechnisch, sondern auch wegen der Entsorgungsfrage umwelttechnisch günstig ist.

Auf dem Markt sind eine Fülle solcher Schneidwerkstoffe, die auf Aluminiumoxid, Siliciumnitrid und Mischkeramiken basieren und durch polykristallines, kubisches Bornitrid (PCBN) ergänzt werden. Diese eignen sich hervorragend für die Zerspanung auch von harten Werkstoffen mit hoher Vickershärte. Neben dem Hartdrehen wird in der Praxis auch verstärkt das Hartdrehen vor dem Schleifen angewendet. Mischkeramik

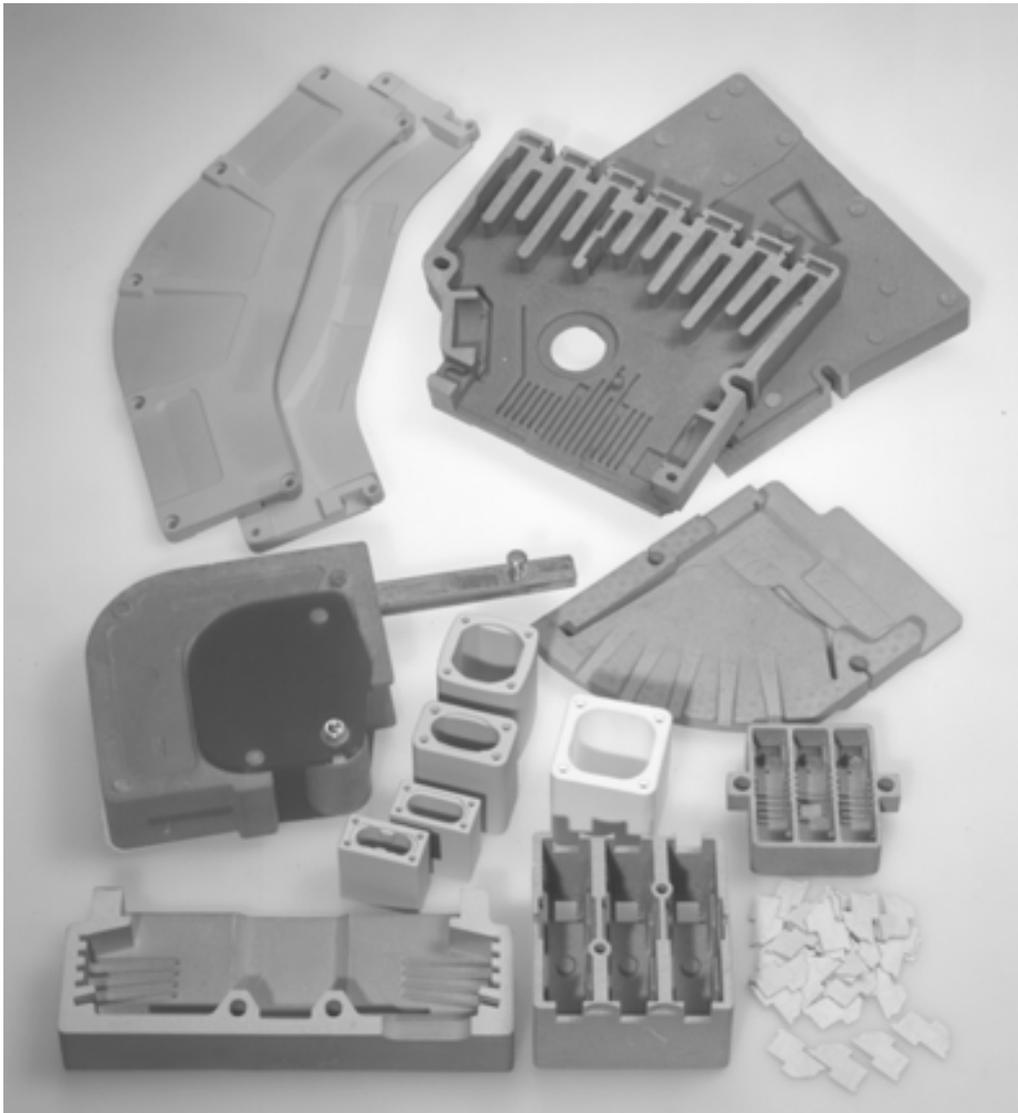
und PCBN-Schneidwerkstoffe empfehlen sich für Hartfeindrehbearbeitung von Werkstücken mit Härten bis 64 HR<sub>C</sub>. In der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Gusseisenwerkstoffen und in der Hartzerspanung werden durch solche Schneidkeramiken die Fertigungszeiten und Produktionskosten deutlich reduziert.

In der Großserienfertigung der Automobilindustrie und bei den Zulieferern haben Siliciumnitridkeramiken beim Hochgeschwindigkeitsdrehen, Aufbohren und Fräsen von Gusseisen bedeutende Marktanteile gewonnen. Auch Mischkeramiken polykristallines kubisches Bornitrid werden hier in der zunehmenden Substitution des Schleifens durch das Drehen ebenfalls immer häufiger eingesetzt.

Schneidkeramik benötigt deutlich höhere Härte als der zu zerspanende Werkstoff. Diese hohe Härte beeinträchtigt letztendlich die Zähigkeit der Schneidwerkstoffe. Deshalb gibt es in der Literatur oft Hinweise, dass Schneidkeramik nicht im unterbrochenen Schnitt einsetzbar ist. Es soll hier aber darauf hingewiesen werden, dass es sehr wohl möglich ist, mit PCBN-Werkstoffen auch Bearbeitung mit unterbrochenem Schnitt durchzuführen.

### 6 Einsatzgebiete und Anwendungen

Technische Keramik wird wegen ihrer besonderen Eigenschaften und Eigenschaftskombinationen eingesetzt. Die folgenden Tabellen zu Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Hochtemperaturtechnik, Elektrotechnik und Elektronik geben einen Überblick über die Einsatzgebiete, dort verwendete Bauteile aus Technischer Keramik und den Grund ihres Einsatzes sowie einige Werkstoffalternativen.<sup>21</sup>



**Bild 106:** Bauteile der Niederspannungstechnik

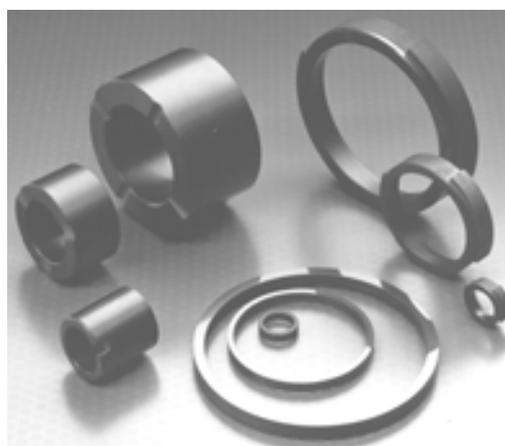
---

<sup>21</sup> Siehe auch Literaturverzeichnis, S. 278.

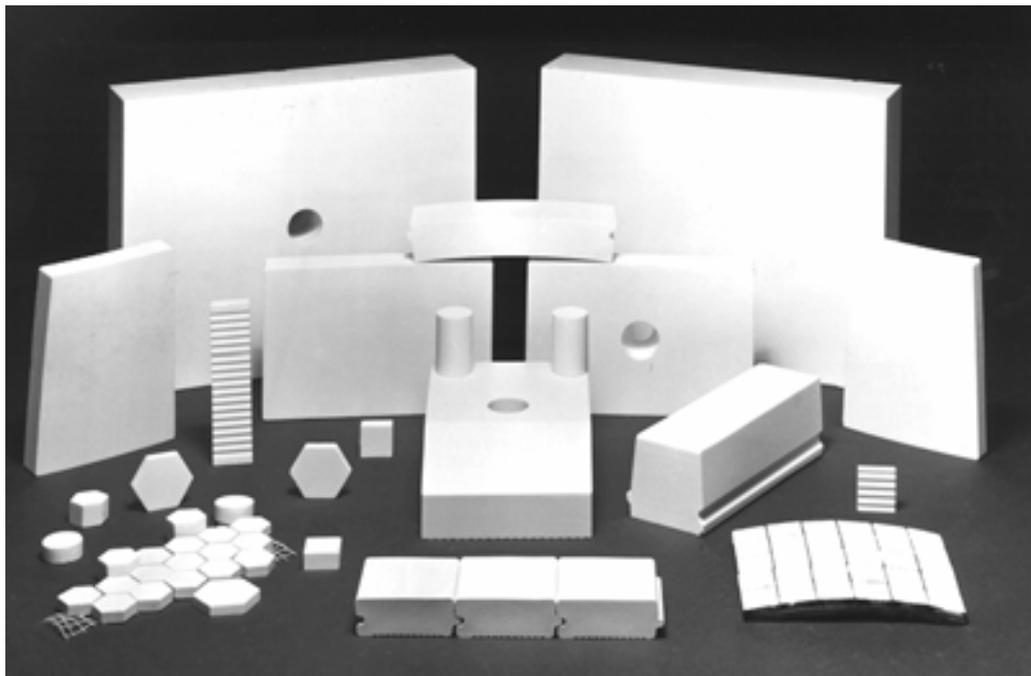
## 6.1 Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Einsatzgebiete	Bauteile	warum Keramik?	Werkstoffe
Allgemeiner Maschinenbau	Beschichtungen, Büchsen, Düsen, Extruderauskleidungen, Führungsrollen, Führungen, Föderelemente von Schneckenextrudern, Gleitlager, Gleitringe, Knetelemente von Schneckenextrudern, Scheren, Schneiden, Schutzhülsen, Schutzrohre, Sichterräder, Sitzringe, Spannschienen, Walzen, Wälzlager, Wellenschutzhülsen	Hohe Verschleißbeständigkeit und/oder Korrosionsbeständigkeit und mechanische Festigkeit	Aluminiumoxid, Siliciumcarbid, Siliciumnitrid, Zirkoniumoxid, Quarzporzellan
	Schleifspindelwellen, Fräsdorn	Große Steifigkeit	
	Steuerräder, Schnellaufende Wälzlager	Geringe Dichte	
	Wälzlager, Wärmeschutz-elemente	Gute Hochtemperaturfestigkeit	

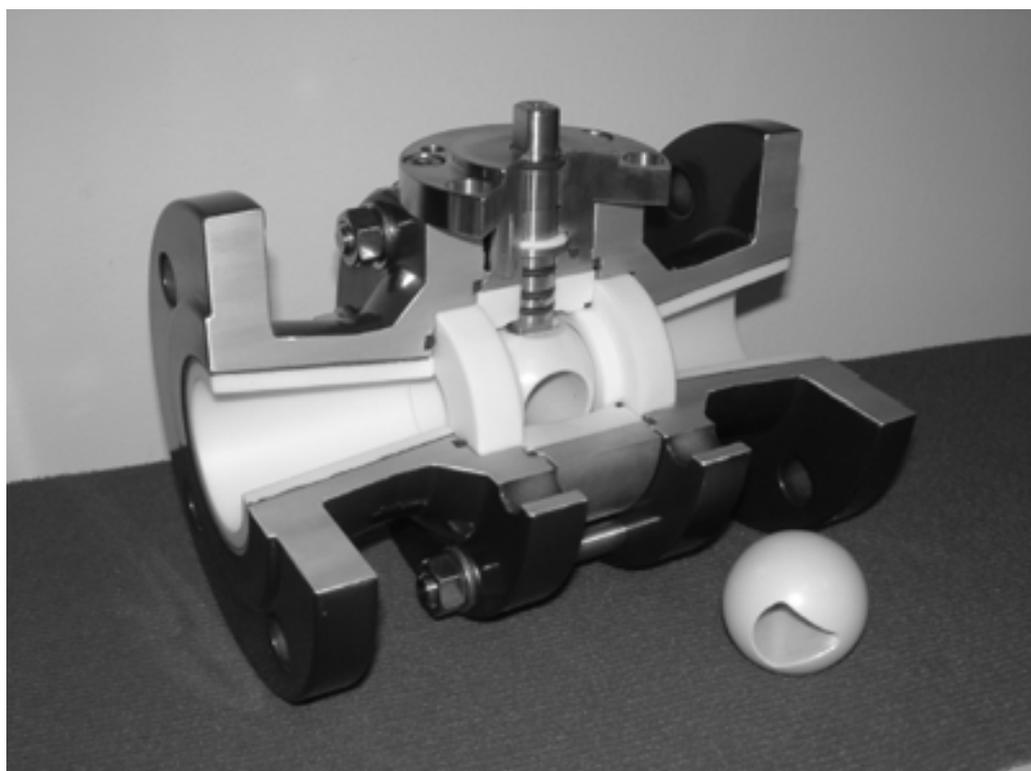
**Tabelle 14:** Anwendungen im allgemeinen Maschinenbau



**Bild 107:** Gleit- und Dichtringe aus SiC



**Bild 108:** Bauteile für Auskleidungen aus Aluminiumoxid



**Bild 109:** Kugelhahn Typ KSV DN 25 PN 40

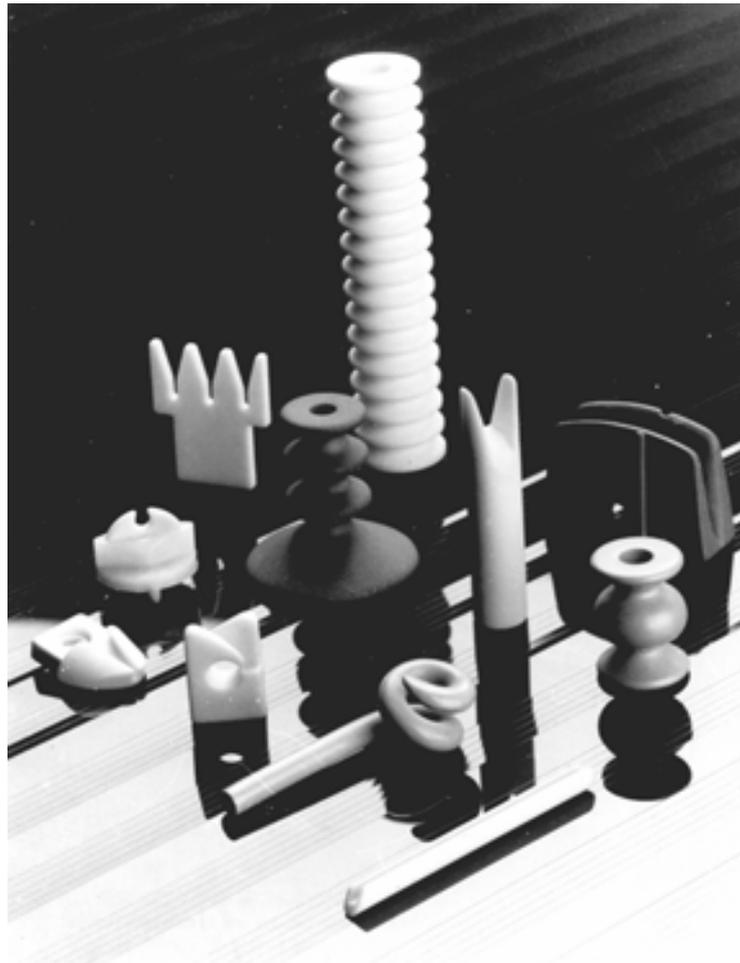
Einsatzgebiete	Bauteile	warum Keramik?	Werkstoffe
<b>Pumpen- und Armaturenbau</b>	Auskleidungen für Laufbuchsen und Zylinder, Dichtscheiben, Gehäuse, Gleitlager, Gleitringdichtungen, Kolben, Kugelkücken, Kugeln, Laufbuchsen, Plunger, Pumpenräder, Regelscheiben, Rotoren, Schieber, Ventilplatten, Wellen, Wellenschutzhülsen, Zylinder	Hoher Verschleißwiderstand und/oder Große Korrosionsbeständigkeit	Aluminiumoxid, Siliciumcarbid, Siliciumnitrid, Quarzporzellan
<b>Anlagenbau</b>	Auskleidungen z. B. für Mühlen, Betonmischer, Behälter, Beläge für Förderschnecken und Antriebsrollen von Förderbändern, Filter, Mahlkörper, Mischer, Rohre, Rührorgane, Rutschen, Sichter	Gute Korrosionsbeständigkeit und Hoher Verschleißwiderstand	Aluminiumoxid, Siliciumcarbid, Siliciumnitrid, Zirkoniumoxid
<b>Papiermaschinenbau</b>	Abstreifleisten, Beläge, Messer, Saugleisten	Hoher Verschleißwiderstand	Aluminiumoxid, Zirkoniumoxid, Siliciumcarbid

**Tabelle 15:** Anwendungen im Pumpen- und Armaturenbau, Anlagenbau und Papiermaschinenbau

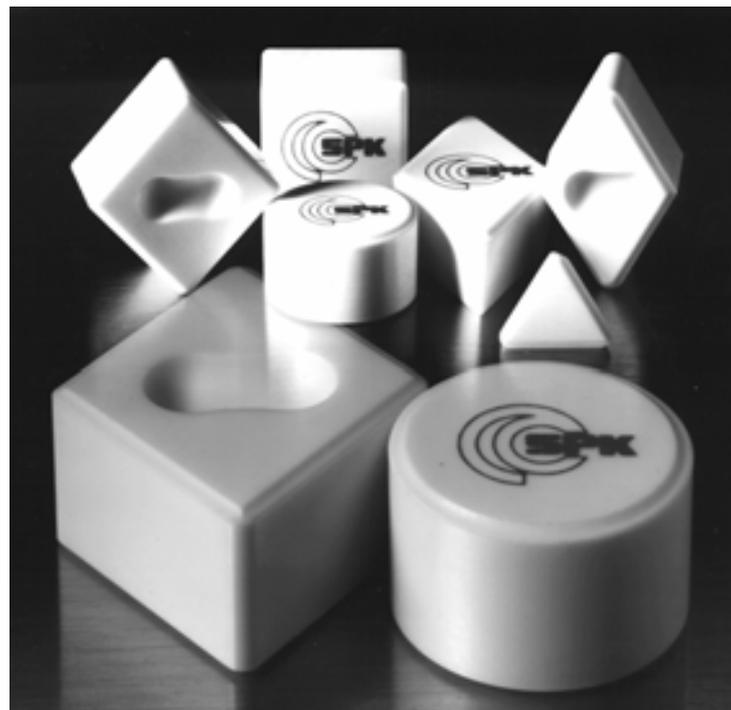
## Einsatzgebiete und Anwendungen

<b>Einsatzgebiete</b>	<b>Bauteile</b>	<b>warum Keramik?</b>	<b>Werkstoffe</b>
<b>Textilmaschinenbau</b>	Abzugsdüsen, Abzugsrohre, Friktionsscheiben, Fadenbremsen, Fadenführer, Haken, Ösen, Rohre, Rollen, Schneidelemente, Spinnringe, Stäbe, Verwirbelungsdüsen	Hoher Verschleißwiderstand und Hohe Oberflächengüte	Aluminiumoxid, Zirkoniumoxid, Quarzporzellan
<b>Metallverarbeitung</b>	Aufweitdorne, Biegewerkzeuge, Bohrer, Drahtziehrollen, Drahtziehkonen, Fräsdorne, Rollen, Sandstrahldüsen, Wendeschnidplatten, Ziehringe	Große Härte und Hoher Verschleißwiderstand	Aluminiumoxid, Zirkoniumoxid
	Gießformen, Gießkerne, Gießtrichter, Lötunterlagen, Siebkerne, Schmelzfilter, Schmelzriegel, Schutzrohre, Schweißbolzen, Schweißdüsen, Schweißelektrodenisolierungen, Schweißleisten, Schweißringe	Große Hochtemperaturfestigkeit und/oder gute Korrosionsbeständigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit	dichter Cordierit, poröser Cordierit, Mullit, Aluminiumoxid, Siliciumnitrid
	Abstandhalter, Lehren	Geringe Wärmedehnung und Hohe Steifigkeit	Cordierit
	Sauerstoffsonden	Sauerstoffionenleitfähigkeit	Zirkoniumoxid

**Tabelle 16:** Anwendungen im Textilmaschinenbau und in der Metallverarbeitung



**Bild 110:** Fadenführer

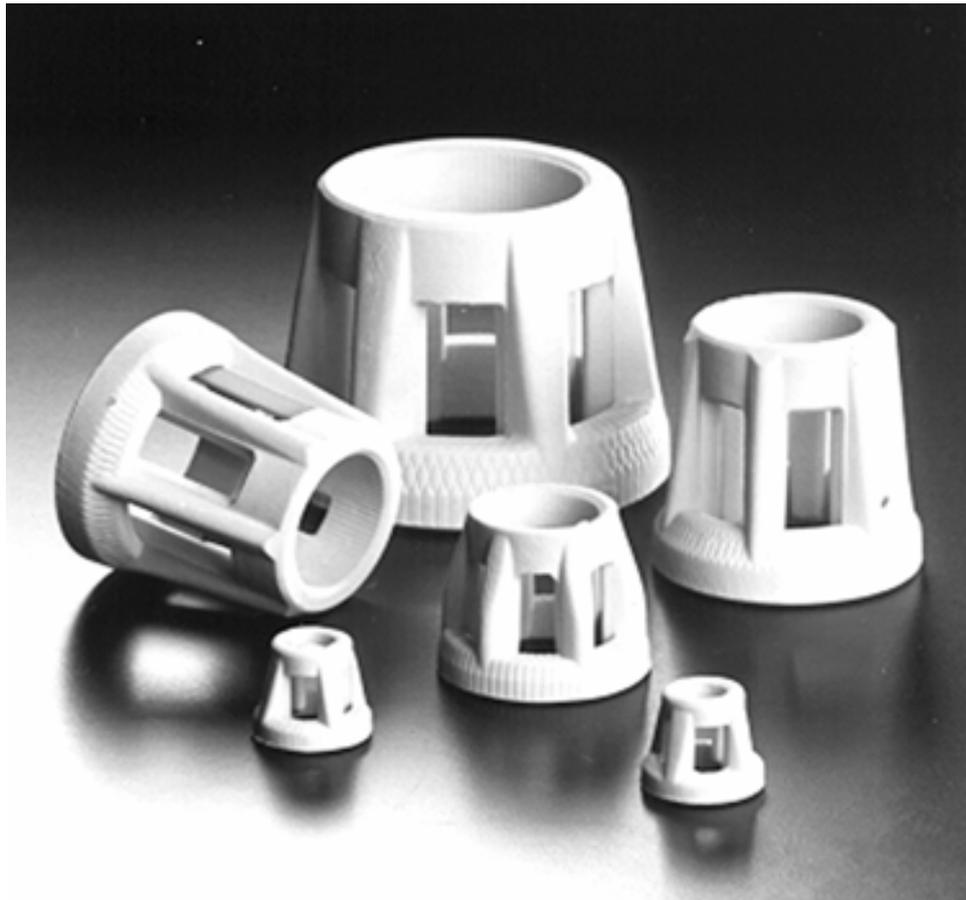


**Bild 111:** Schneidkeramik

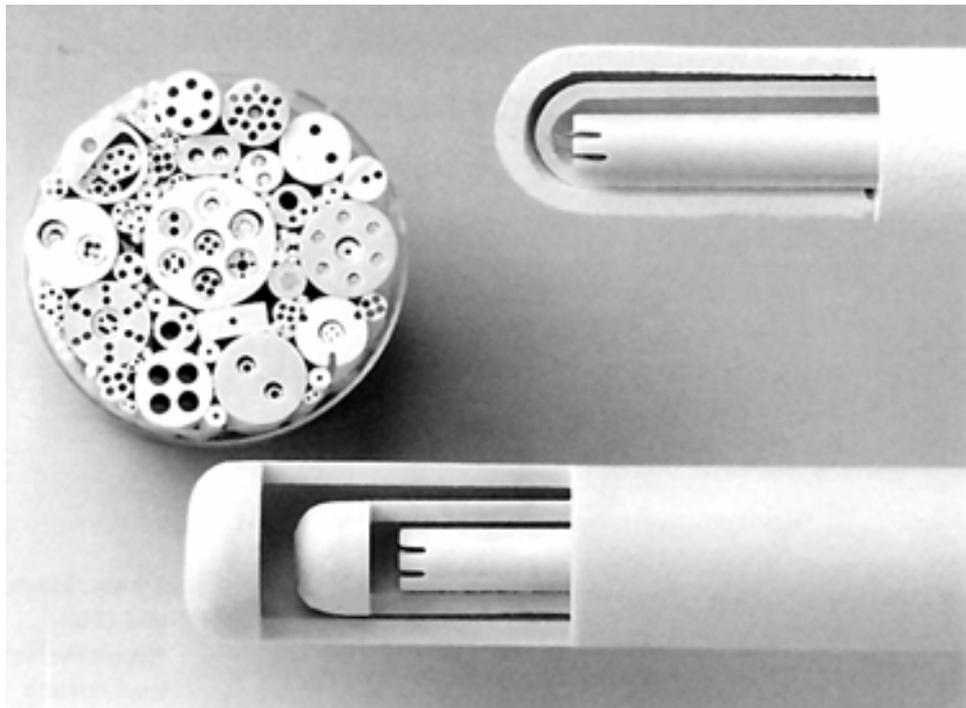
## Einsatzgebiete und Anwendungen

<b>Einsatzgebiete</b>	<b>Bauteile</b>	<b>warum Keramik?</b>	<b>Werkstoffe</b>
<b>Motorenbau, Turbinenbau</b>	Brennraumauskleidungen, Kolbenboden, Laufbuchsen, Portliner	Wärmeisolation	Aluminiumtitanat
	Kipphebelbeläge, Ventile, Ventilführungen, Ventilsitze	Hoher Verschleißwiderstand, Geringe Dichte, Härte	Siliciumnitrid, Siliciumcarbid
	Kolbenbolzen, Turboladerrotoren, Wälzlager	Geringe Dichte hohe Festigkeit	Siliciumnitrid, Siliciumcarbid
	Dieselskatalysatoren, Katalysatorträger	Gute Korrosions- und Temperaturbeständigkeit	
	Zündkerzen, Glühkerzen	Elektrische Isolation und Temperaturbeständigkeit	techn. Porzellan
	Gasturbinenräder, Turbinenschaufeln und -leitschaufeln, Turboladerlaufräder und -gehäuse	Hohe Temperaturfestigkeit	Siliciumnitrid, Siliciumcarbid
	Lambdasonden	Sauerstoffionenleitfähigkeit	Zirkoniumoxid
<b>Chemie- und Verfahrenstechnik</b>	Auskleidungen, Laborporzellan, Pyrometerrohre	Gute Korrosions- und Temperaturbeständigkeit, Hoher Verschleißwiderstand	Aluminiumoxid, Quarzporzellan, Mullit
	Füllkörper, Katalysatorträger	Gute Korrosions- und Temperaturbeständigkeit	Aluminiumoxid
	Filter	Gute Korrosionsbeständigkeit	Aluminiumoxid

**Tabelle 17:** Anwendungen im Motorenbau, Turbinenbau und in der Chemie- und Verfahrenstechnik



**Bild 112:** Füllkörper

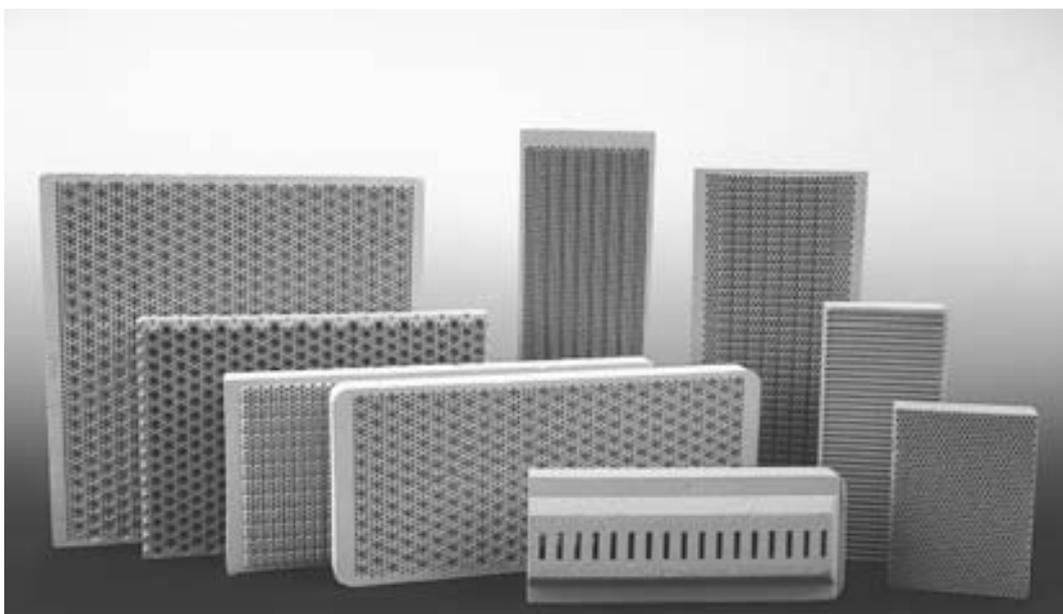


**Bild 113:** Pyrometerrohre

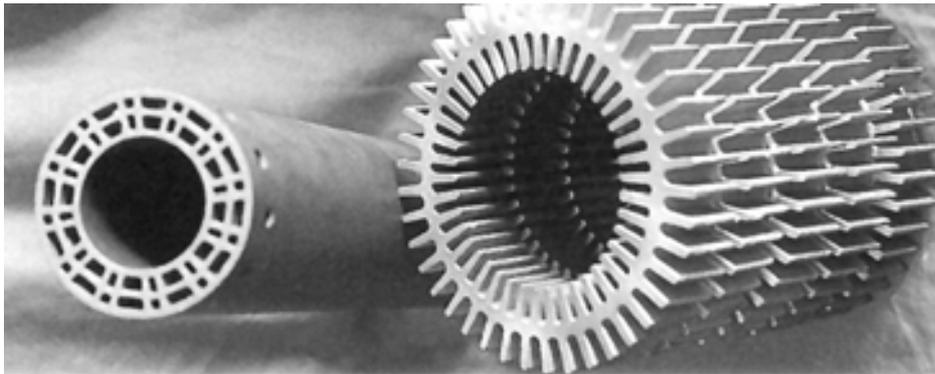
## 6.2 Hochtemperaturtechnik

<i>Einsatzgebiete</i>	<i>Bauteile</i>	<i>warum Keramik?</i>	<i>Werkstoffe</i>
<b>Ofenbau und Brenntechnik</b>	Katalysatoren	Gute Hochtemperaturbeständigkeit	
	Balken, Brennerdüsen, Denox-Stäbe, Flammrohre, Heizstäbe, Heizkesselteile, Ofenauskleidungen, Platten, Rekuperatoren, Strahlrohre, Stützen, Tellerkapseln, Tragrollen, Wärmetauscher	Wärmeleitfähigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit	Siliciumcarbid, Siliciumnitrid
<b>spezielle Anwendungen</b>	Glühstrumpfhalter, Infrarotstrahler, Lochstrahler, Schweißdüsen, Tiegel	Temperaturwechselbeständigkeit, Gute Hochtemperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit	Cordierit, Aluminiumoxid

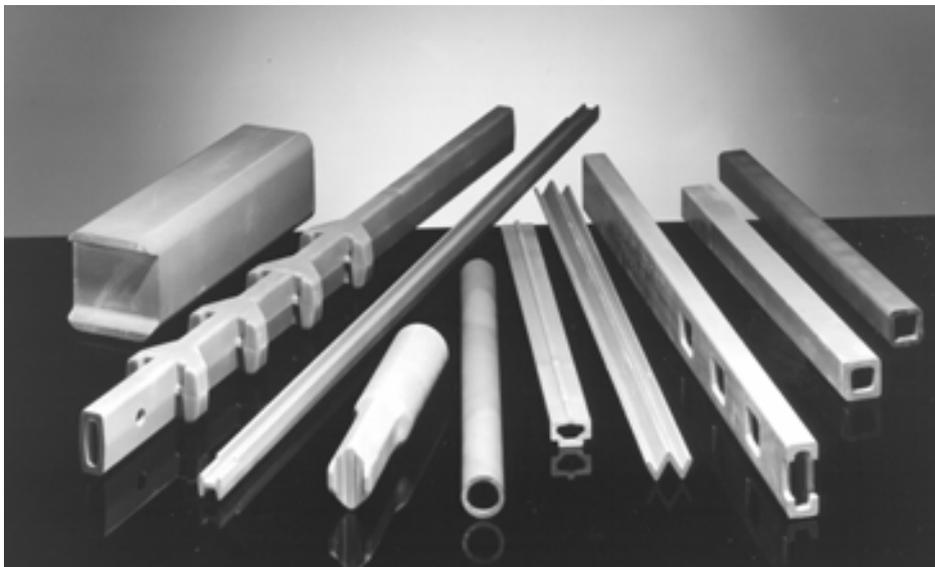
**Tabelle 18:** Anwendungen in der Hochtemperaturtechnik



**Bild 114:** Gasstrahlerplatten



**Bild 115:** Wärmetauscher



**Bild 116:** Brennhilfsmittel (Ständer und Balken)

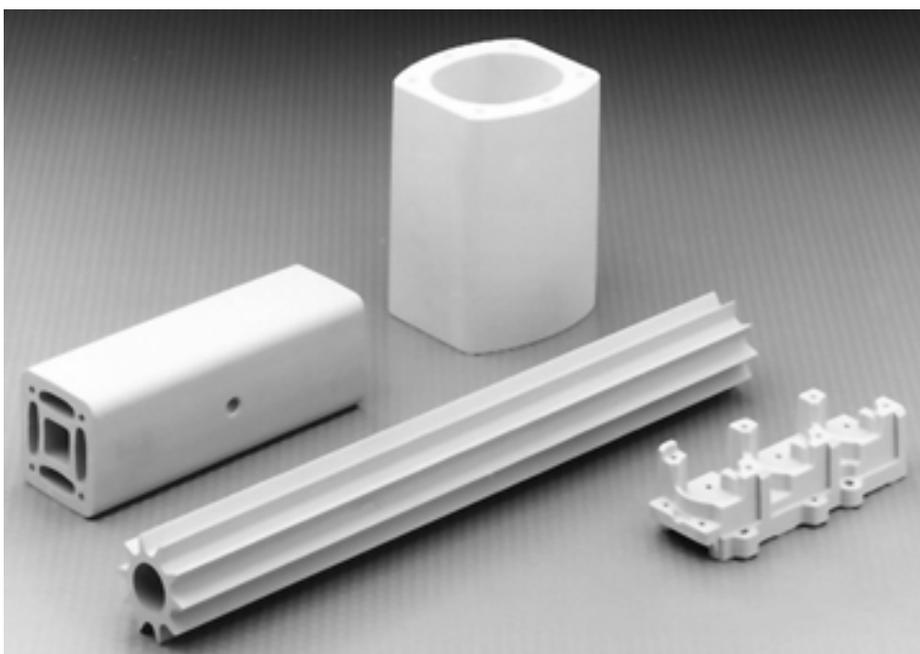


**Bild 117:** Brennhilfsmittel

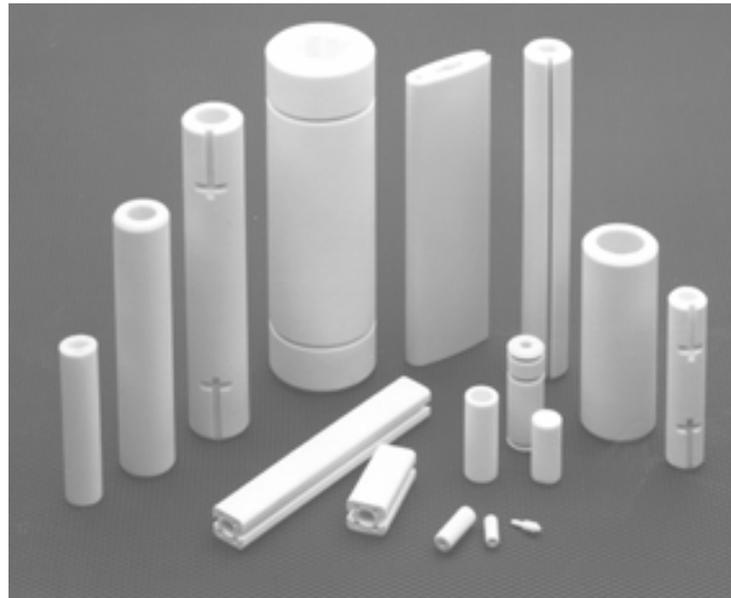
### 6.3 Elektrotechnik

<b>Einsatzgebiete</b>	<b>Bauteile</b>	<b>warum Keramik?</b>	<b>Werkstoffe</b>
<b>Isolierteile</b>	Antennenschäfte, Distanzstücke, Durchführungen, Endbuchsen, Gewinderohre, Haltestifte, Hülsen, Justierstifte, Kontaktfederhalter, Potentiometerringe, Reglerringe, Reglersockel, Rohre, Schaltstifte, Schlitzrohrplatten, Schutzrohre, Sicherungs- außenrohre, Sicherungsgehäuse, Sicherungskörper, Sicherungsrohre, Sicherungssockel, Sicherungsunterteile, Widerstansträger- körper	Elektrische Isolation, Geringer Verlustfaktor, Mechanische Festigkeit	Steatit, Cordierit, Mullit, Aluminiumoxid, Magnesiumoxid Tonerde- porzellan

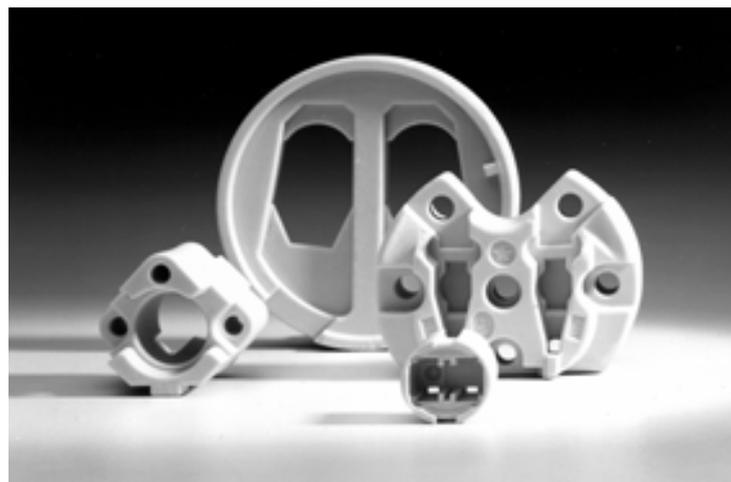
**Tabelle 19:** Anwendungen in der Elektrotechnik – Isolierteile



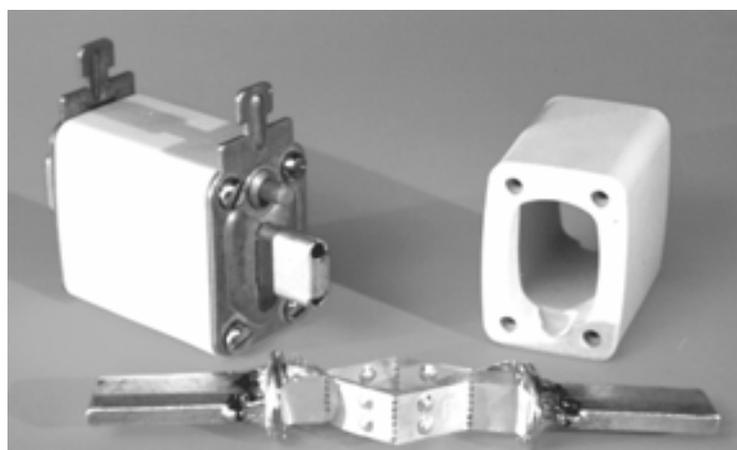
**Bild 118:** NH-Patrone, Sockel u. a.



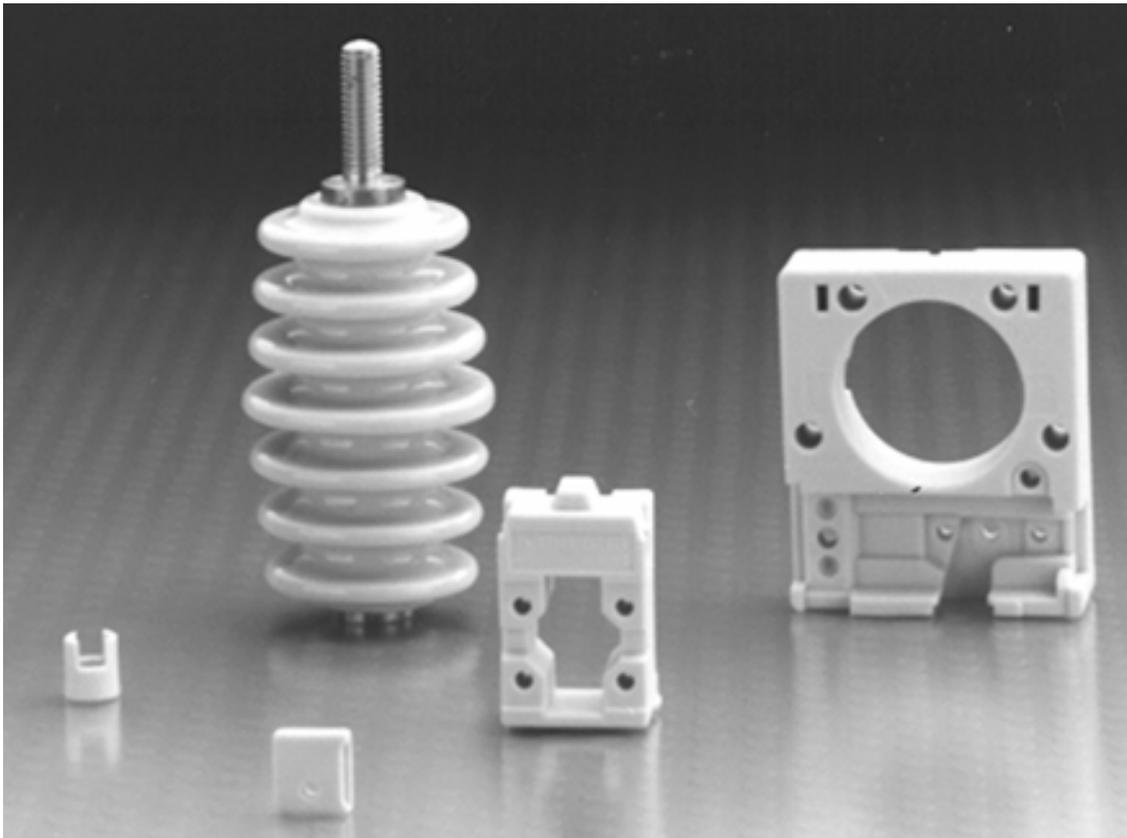
**Bild 119:** Widerstandskörper



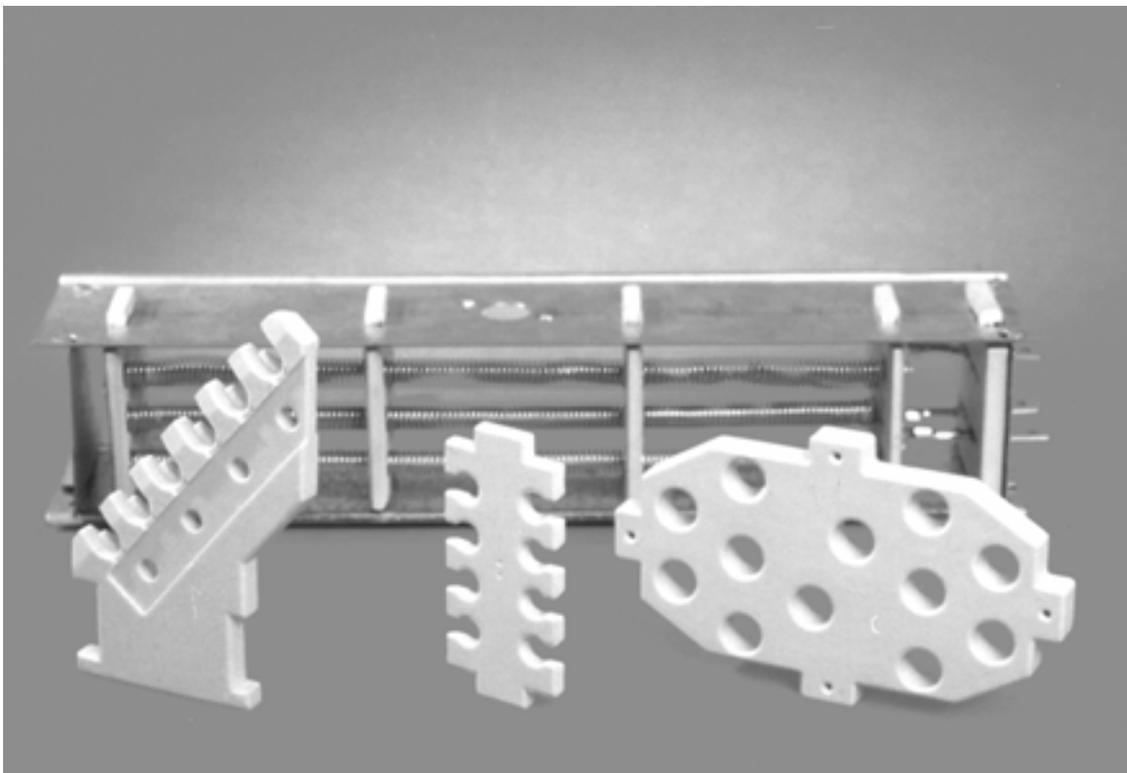
**Bild 120:** Fassungen



**Bild 121:** NH-Sicherung



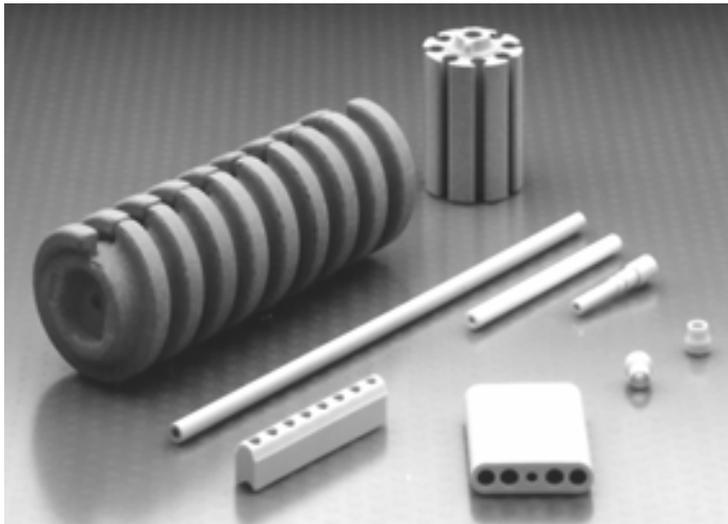
**Bild 122:** Durchführung, Sockel und Isolierkörper für Halogenlampe



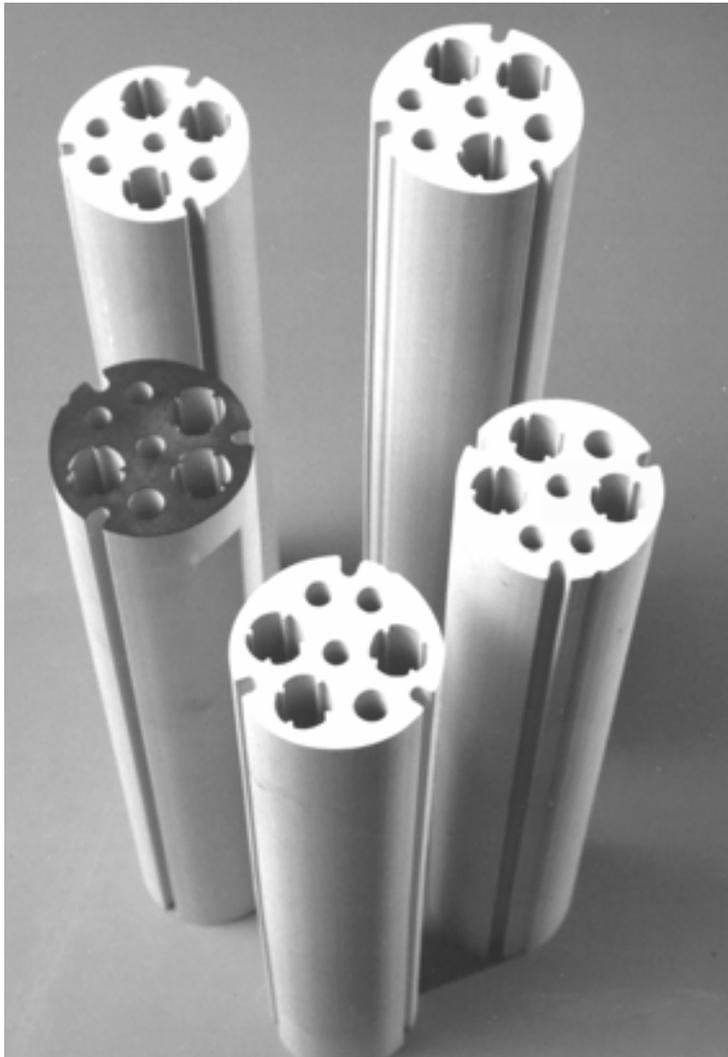
**Bild 123:** Heizleiterträger

<b>Einsatzgebiete</b>	<b>Bauteile</b>	<b>warum Keramik?</b>	<b>Werkstoffe</b>
<b>Thermisch belastete Isolierteile</b>	Anschlussklemmen, Fassungen, Funkenschutzkammern, Funkenschutzplättchen, Gehäuse, Gliederheizkörper, Glühkerzen, Grundplatten, Heizleiterrohre, Heizleiterträger, Heizpatronen, Herdanschlussklemmen, Isolierperlen, Kammerplättchen, Klemmen, Lampenfassungen, Lochleisten, Lochplatten, Mehrlochrohre, Schutzrohre, Sicherungsaußenrohre, Tragleisten, Tragsteine, Wendelplatten, Widerstandsträgerkörper, Zündelektrodenhalter, Zündkerzen, Zugentlastungsstücke	Elektrische Isolation, Geringer Verlustfaktor, Mechanische Festigkeit, Temperaturbeständigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit	Steatit, Cordierit, Mullit, Aluminiumoxid, Magnesiumoxid
	Brennstoffzellen, Sensoren	Ionenleitfähigkeit	Zirkoniumoxid
	Leistungswandler	Gute Temperaturbeständigkeit	Aluminiumoxid, Aluminiumnitrid
	Kühlkörper	Sehr hohe Wärmeleitfähigkeit und Elektrische Isolationsfähigkeit	Aluminiumoxid, Aluminiumnitrid

**Tabelle 20:** Thermisch belastete Isolierteile der Elektrotechnik



**Bild 124:** Verschiedene Isolierteile



**Bild 125:** Isolierrohre (Mehrlochrohre)

<b>Einsatzgebiete</b>	<b>Bauteile</b>	<b>warum Keramik?</b>	<b>Werkstoffe</b>
<b>Hochspannungstechnik</b>	Durchführungen, Freileitungsisolatoren, Gehäuseisolatoren, Hochfrequenzisolatoren, Hohlisolatoren, Langstabilisatoren, Massivstützer, Oberleitungsisolatoren, Stützer	Mechanische Festigkeit, Alterungsbeständigkeit, Elektrische Isolation	Tonerdeporzellan, Quarzporzellan, Steatit

**Tabelle 21:** Anwendungen in der Hochspannungstechnik

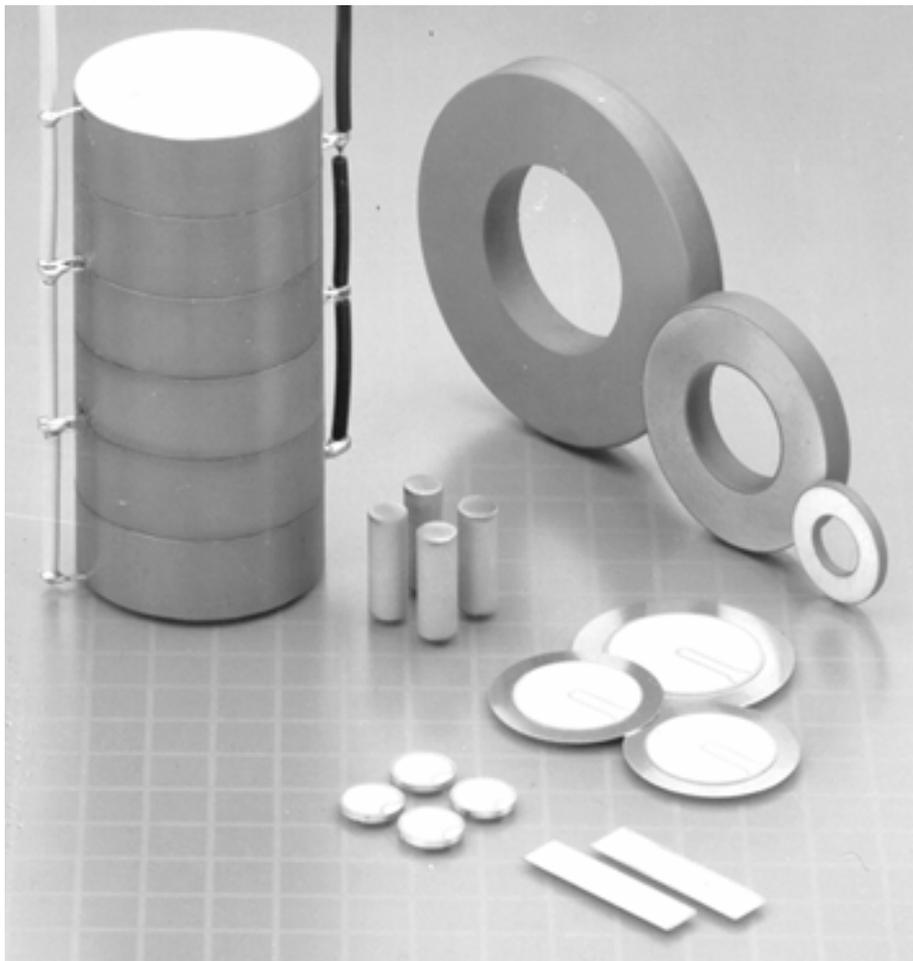
## 6.4 Elektronik

<b>Einsatzgebiete</b>	<b>Bauteile</b>	<b>warum Keramik?</b>	<b>Werkstoffe</b>
<b>Elektronik allgemein</b>	Durchführungen, Gehäuse, Ferulen, Isolierteile, Kühlkörper, Sleeves, Substrate, Überspannungsableiter	Elektrische Isolation, Temperatur und Spezielle elektrische Eigenschaften	Tonerdeporzellan, Quarzporzellan, Aluminiumoxid, Aluminiumnitrid
<b>Piezotechnik</b>	Signalwandler: akusto-elektrisch, elektro-akustisch, elektro-mechanisch, mechano-elektrisch	Piezoeffekt	Bleizirkonattitanat (Piezokeramik; PZT)

**Tabelle 22:** Anwendungen in der Elektronik



**Bild 126:** Leistungshalbleitergehäuse aus Keramik-Metall-Verbund



**Bild 127:** Verschiedene Bauteile aus Piezokeramik

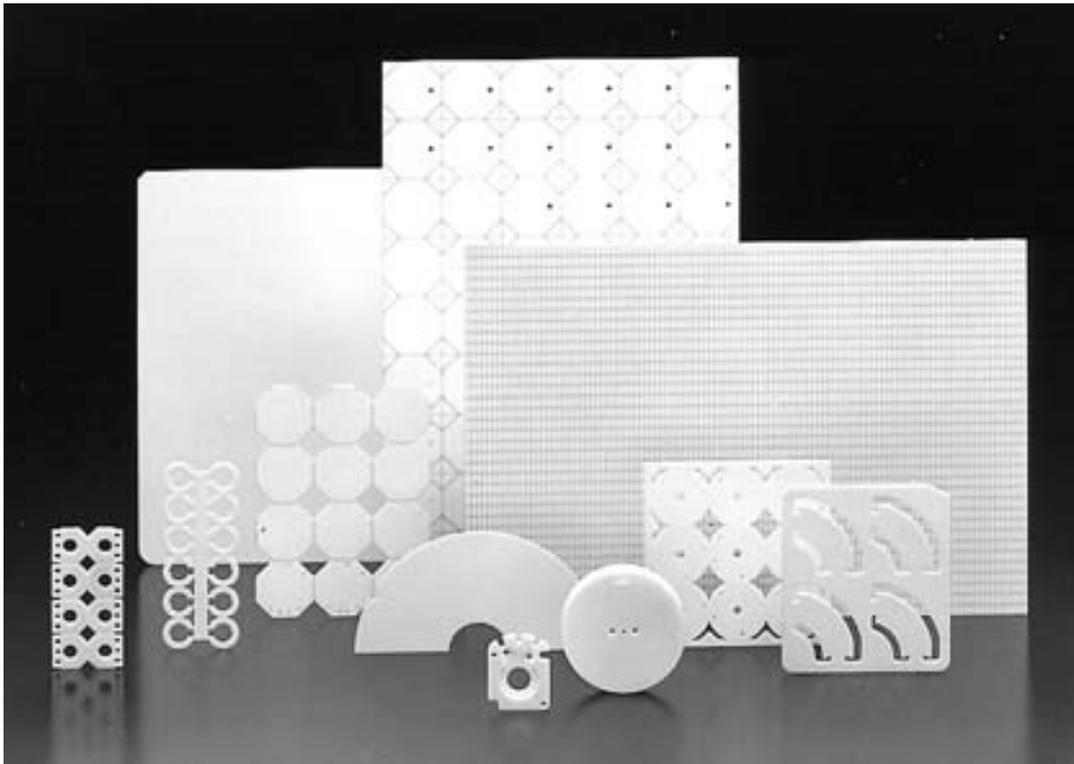


Bild 128: Substrate aus Aluminiumoxid

## 6.5 Medizintechnik

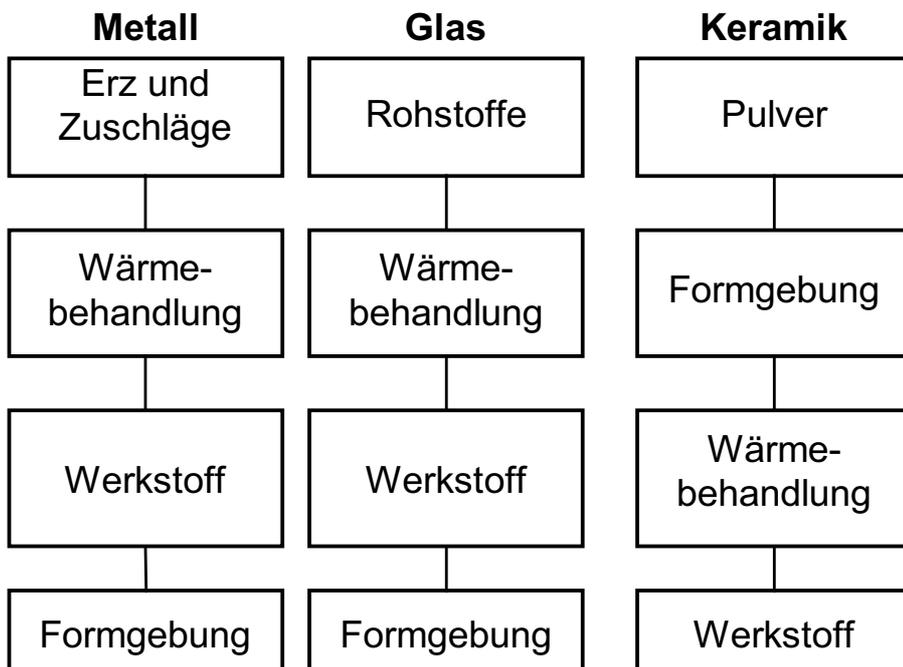
<i><b>Einsatzgebiete</b></i>	<i><b>Bauteile</b></i>	<i><b>warum Keramik?</b></i>	<i><b>Werkstoffe</b></i>
<b>Medizintechnik</b>	Gehörknöchelchen, Granulate, Hüft-, Schulter und Kniegelenkprothesen, Knochenersatz, Zahnimplantate	Mechanische Festigkeit, Oberflächengüte, Bioverträglichkeit	Aluminiumoxid, Calcium- phosphat, Zirkoniumoxid, Hydroxylapatit

Tabelle 23: Anwendungen in der Medizintechnik

## 7 Keramikgerechtes Konstruieren

Im Gegensatz zu den meisten anderen Werkstoffen erfolgt in der keramischen Technologie die Formgebung vor dem Einwirken des werkstoffbildenden thermischen Prozesses, bei dem das geformte Bauteil noch einen Schwindungsprozess durchläuft.

Erst nach dem Brennprozess liegt der eigentliche keramische Werkstoff vor. Dies beeinflusst auch die Konstruktion keramischer Bauteile.



**Bild 129:** Werkstoffbildung

Den Konstrukteuren des Maschinen- und Gerätebaus, der Kraftfahrzeugtechnik und der Verfahrenstechnik ist der Umgang mit den üblichen metallischen und polymeren Werkstoffen (Stahl, Guss, Aluminiumlegierungen, Nickel-Basis-Legierungen etc.) in Fleisch und Blut übergegangen. Viele Ingenieurgenerationen haben mit der Anwendung dieser Werkstoffe Erfahrungen gesammelt, die auch in der Ausbildung dem Konstrukteurnachwuchs übermittelt werden.

Anders ist die Situation beim Einsatz neu entwickelter Werkstoffe oder beim Erschließen neuer Anwendungsgebiete für Werkstoffe, die zwar schon lange bekannt sind, aber bisher nur in einem begrenzten Einsatzbereich angewendet wurden. Die Werkstoffe der **Technischen Keramik** zählen hierzu.

Bei der Lösung eines technischen Problems muss der Konstrukteur technische Elemente entwerfen; dabei muss er bei keramischen Werkstoffen besonders auf die erforderliche **werkstoffgerechte Konstruktion** achten.

Duktile Werkstoffe reagieren und kompensieren kleinräumige/örtliche Überlastungen mit elastischer Dehnung nach dem Hook'schen Gesetz und mit der plastischen Formgebungsreserve.

Für harte und damit spröde Werkstoffe gilt das nicht, sie sind also nicht fehlertolerant. Damit bestehen wesentliche Unterschiede in der Belastungsfähigkeit von Bauteilen aus duktilen (metallischen) und spröden/harten (keramischen) Werkstoffen. Dies macht dann auch differierende Gestaltungsregeln.

Gewisse Analogien findet der Konstrukteur in den Grundregeln des gussgerechten Konstruierens und den Fertigungsmöglichkeiten der Pulvermetallurgie.

Neben der Gestaltung der Bauteile selbst wirft die Einbindung keramischer Komponenten in metallische Baugruppen eine Reihe von konstruktiven Problemen auf.

In den meisten Anwendungsfällen werden einzelne Komponenten einer Konstruktion (z. B. austauschbare Verschleißteile) aus keramischen Werkstoffen hergestellt und mit den benachbarten metallischen Bauteilen und Baugruppen verbunden.

Die Aufgabe des Konstrukteurs ist es, die überragenden Eigenschaften der Technischen Keramik zielgerichtet und wirtschaftlich auszunutzen, ohne dabei ihre einschränkenden Eigenschaften zur Wirkung kommen zu lassen. Dies versteht man unter keramikgerechter Konstruktion.

### 7.1 Ablauf eines Bauteilentwurfs

Die Aufgabe eines Konstrukteurs ist die Lösung eines technischen Problems. Diese Lösung muss zum einen die Erfüllung der technischen Aufgabe und zum anderen deren wirtschaftlicher Durchführbarkeit beinhalten. Es ist hierbei notwendig, dass beide Bedingungen erfüllt werden. Dies bedeutet, dass ein Kompromiss zwischen den aufzuwendenden Kosten und dem Funktionsgewinn erzielt werden muss. Lösungen, die entweder die technische Funktion nicht zuverlässig gewährleisten oder bei denen die Kosten zu hoch sind, befriedigen nicht.

Ein guter, keramikgerechter Entwurf zeichnet sich dadurch aus, dass die vorteilhaften Eigenschaften des keramischen Werkstoffs möglichst optimal genutzt werden und dessen Nachteile (wie Sprödigkeit) durch Gestaltungsmaßnahmen (z. B. Funktionstrennung, Modultechnik, druckbelastete Bauteile etc.) abgeschwächt bzw. nicht wirksam werden.

In der Planungsphase müssen zunächst Informationen über die genaue Funktion des zu entwerfenden Bauteils und die Eigenschaften der infrage kommenden keramischen Werkstoffe beschafft werden. Dazu ist es sinnvoll, dass sich der Konstrukteur und der Bauteilhersteller in einem möglichst frühen Stadium der Planungsphase zusammensetzen, um eine prinzipielle Entscheidung über die Machbarkeit einer Konstruktion zu fällen. Dabei sollten nicht nur die technischen Randbedingungen, sondern auch der Kostenrahmen berücksichtigt werden, um die Gefahr von Fehlinvestitionen, auch bei den Planungs- und Entwicklungskosten, möglichst frühzeitig erkennen zu können. Besonders vorteilhaft ist es, wenn zum einen der Konstrukteur bereits Kenntnisse im Umgang mit Keramik besitzt, und zum anderen der Bauteilproduzent Verständnis für die technischen Abläufe beim Kunden hat.

Eine nützliche Voraussetzung für die Entscheidung über die technische Machbarkeit und die Kostenkalkulation ist ferner eine vollständige und korrekte Zeichnung. Bezüglich ihrer ersten Ausführung, mit der sich ein Konstrukteur an den Keramikhersteller wenden sollte, wäre es wünschenswert, wenn dort alle veränderbaren Partien (Form, Maße, Toleranzen, Oberflächenzustände etc.) deutlich hervorgehoben würden. Dasselbe gilt für diejenigen Größen, die unbedingt einzuhalten sind.

In der ersten Diskussion mit dem Keramikhersteller sollten die Funktionsweise und die auftretenden Belastungen des Bauteils erörtert werden, um die für den Einsatzfall optimale Keramik festzulegen. Im zweiten Schritt sind die oben genannten, veränderbaren Partien in Bezug auf die spätere Funktion zu diskutieren und ggf. auftretende Schwierigkeiten für beide Seiten klar herauszustellen.

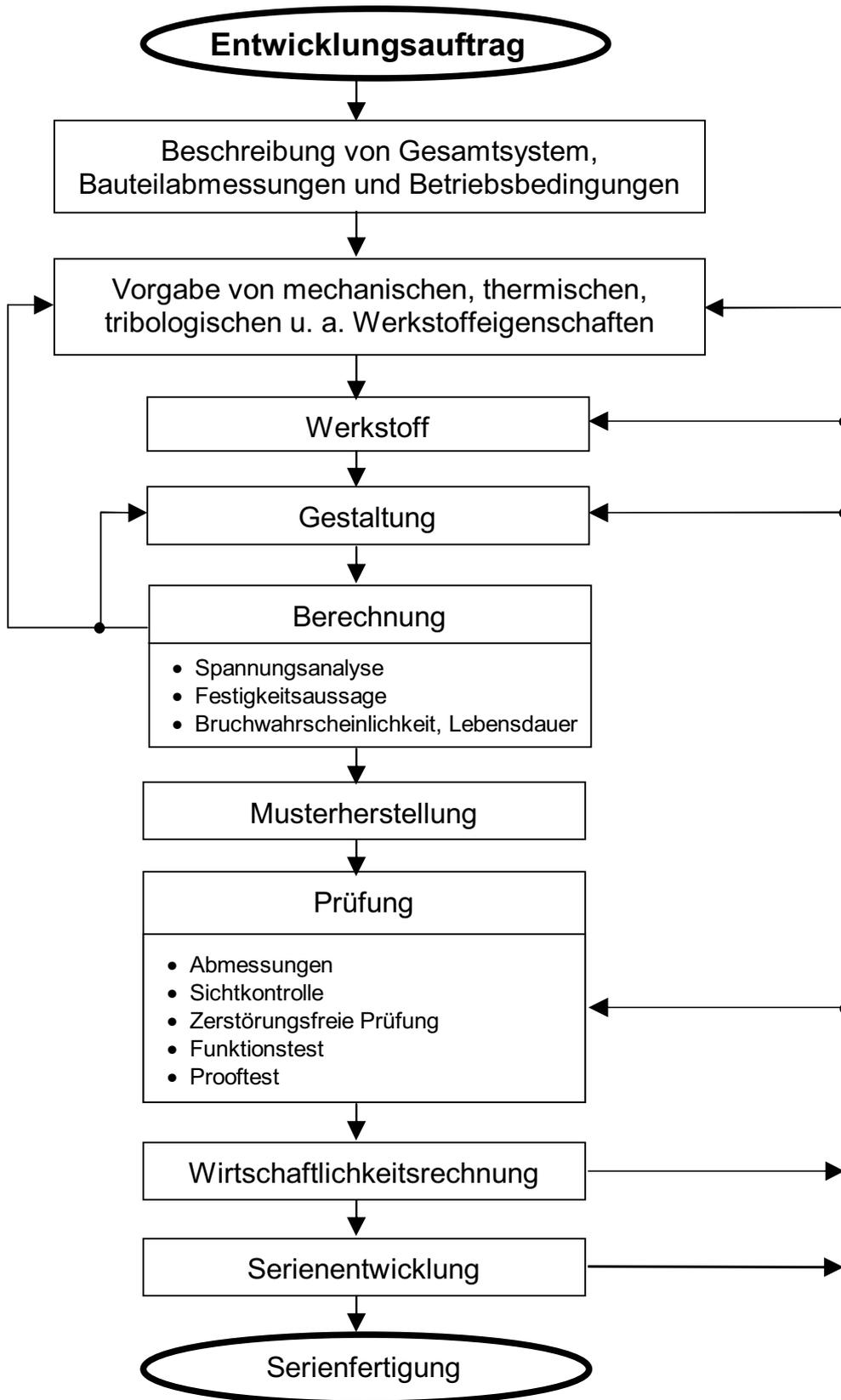
Beim ersten Gespräch zwischen Anwender und Bauteilhersteller sollten bereits Angaben über die zu erwartenden Stückzahlen gemacht werden, da diese Angaben sich ganz entscheidend auf die Wahl des zu verwendenden Herstellungsverfahrens und dadurch auf die zu erwartenden Herstellungskosten auswirken. Kleine Stückzahlen, Einzelstücke und Versuchsteile werden häufig aus einem Rohling herausgearbeitet, während sich die Anfertigung von aufwändigen Werkzeugen z. B. für das Trockenpressen, Strangpressen oder Spritzgießen erst für große Serien lohnt. Die nach verschiedenen Verfahren hergestellten Bauteile besitzen nicht unbedingt identische Eigenschaften, was bei der Übertragung von Ergebnissen aus Vorversuchen auf die normale Fertigung berücksichtigt werden sollte (z. B. hinsichtlich Dichtegradienten, Toleranzen, Wandstärken, Konizitäten, Eigenspannungen etc.).

Auf der Basis der ihm vorliegenden Zeichnungen und des mit dem Anwender geführten Gesprächs kann der Bauteilhersteller fertigungsbedingt notwendig werdende Änderungen vorschlagen. Diese Änderungen beeinflussen die Funktion des Bauteils häufig in keinsten Weise, ermöglichen jedoch oft erst dessen Herstellbarkeit oder eine Reduktion der Kosten und dadurch erst den Übergang zur wirtschaftlichen Machbarkeit.

Nach Besprechung und Genehmigung der geänderten Konstruktionszeichnungen werden in der Regel einige Musterteile hergestellt und getestet. Aufgrund der Erfahrungen, die mit diesen Teilen im Feldtest gemacht werden, wird entschieden, ob mit der Bearbeitung des Produktionsauftrags begonnen werden kann oder ob die Konstruktion nochmals verändert werden muss.

Die Eigenschaften von Prototyp und Serienbauteil können differieren. Für Freigabeuntersuchungen sollten daher Muster aus seriennaher Fertigung benutzt werden.

# Konstruieren



**Bild 130:** Entwicklung keramischer Bauteile

## 7.2 Konstruktionshinweise

Jedes der möglichen Formgebungs- und Bearbeitungsverfahren bringt bestimmte, bei der Konstruktion zu berücksichtigende Forderungen mit sich. Auch die physikalischen Eigenschaften von keramischen Werkstoffen und von Keramikverbunden mit metallischen Komponenten sind hierbei mit einzubeziehen. Im Folgenden werden einige dieser Forderungen erläutert.

### 7.2.1 Einfluss der Materialeigenschaften

Aufgrund des vollständigen Fehlens plastischen Verformungsvermögens bei niedrigen und mittleren Temperaturen versagt Keramik spontan beim Erreichen der örtlichen Materialfestigkeit im Bereich der kritischen Gefügeheterogenitäten. Die hohen Spannungen treten besonders im Bereich von kleinen Radien, scharfen Kanten, Stufen, Absätzen, Bohrungen sowie bei punkt- oder linienförmigen Kräfteinleitungen auf. Unter Umständen werden hier aufgrund der teilweise erheblichen Kerbwirkung dieser geometrischen Gegebenheiten Spannungen erzeugt, welche die Grenze der Materialfestigkeit viel früher erreichen, als es die äußere Belastung der Komponente erwarten lässt.

Deshalb sollten bei der konstruktiven Gestaltung eines keramischen Bauteils als Kerben wirkende geometrische Formen (Spannungskonzentrationen) vermieden oder zumindest nur in abgeschwächter bzw. optimierter Form verwendet werden. Eine besondere Stärke keramischer Materialien ist die hohe Druckbelastbarkeit. Ein primäres Ziel einer keramikgerechten Konstruktion sollte deshalb darin gesehen werden, diese Eigenschaft möglichst optimal auszunutzen und die Zahl der Bereiche, in denen das Teil zug- bzw. biegebelastet wird, möglichst klein zu halten. In den zugbelasteten Bereichen sollten starke Spannungskonzentrationen vermieden werden.

Diese Grundsätze werden von manchen Anwendern oft nicht ausreichend beachtet, sondern es wird häufig gewünscht, eine Komponente, die ursprünglich „metallisch“ ausgelegt war, formgleich in einer keramischen Ausführung geliefert zu bekommen. Dies kann aber nicht nur die Herstellungskosten erhöhen, sondern stellt gelegentlich auch die Machbarkeit des Produkts infrage.

### 7.2.2 Einfluss des Formgebungsverfahrens

Ebenso wie bei der Herstellung metallischer oder polymerer Werkstoffe besitzt auch jedes Fertigungsverfahren für keramische Bauteile seine besonderen Vorzüge, aber auch seine Grenzen.

So können beispielsweise mittels des **Schlickergießverfahrens** Teile mit konstanter Wandstärke hergestellt werden, wobei die erzielbaren Wandstärken im Bereich von bis maximal einigen Millimetern (abhängig vom Werkstoff) liegen. Planparallele Seitenflächen sind nur mit einem erhöhten Aufwand herstellbar, da hierdurch die Entformbarkeit des getrockneten Gießteils erschwert wird. Formhinterschneidungen sind ebenfalls schwierig und nur durch aufwändige, mehrteilige Gießformen erzielbar.

Durch **Extrudieren** werden üblicherweise rohr- oder stangenförmige Teile angefertigt. Hier liegt die Fertigungskunst in der Einhaltung des Querschnitts des Körpers und in der Vermeidung von unzulässigen Verformungen (Durchbiegung, Ovalisierung etc.) in axialer und radialer Richtung.

Mittels **Spritzgusstechnik** ist es möglich, sehr kompliziert geformte, endformnahe Körper herzustellen, wobei die Werkzeugkosten und die zu fertigende Teileanzahl bei diesem Verfahren ganz erhebliche Faktoren bei der Kostenkalkulation darstellen.

Die **isostatische Presstechnik** wird unter anderem zur Anfertigung von Rohlingen mit besonders gleichmäßiger Dichte verwendet, die anschließend durch spanabhebende Formgebungsverfahren, wie Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen oder Sägen (mit Diamantwerkzeugen) im ungebrannten Zustand weiterbearbeitet werden.

Ein häufig verwendetes Verfahren für die Serienproduktion von kleineren Teilen ist die **Trockenpresstechnik**. Mit diesem Verfahren lassen sich relativ flache Teile mit einem Höhen/Wandstärkenverhältnis  $< 4$  (in Sonderfällen  $< 8$ ) und keinen zu starken Höhenunterschieden (Sackbohrungen, Stufen etc.) wirtschaftlich herstellen. Die Presswerkzeuge werden aufgrund der hohen Härte der keramischen Pulver sehr stark verschleißbeansprucht. Hinsichtlich der geforderten Maßhaltigkeit der Teile ist dadurch die Standzeit der Werkzeuge begrenzt.

### 7.2.3 Modulbauweise

Kompliziert geformte oder große Keramikkörper lassen sich mit den im Vorhergehenden beschriebenen Formgebungsverfahren u. U. nicht oder nur mit erheblichem Aufwand herstellen. Eine bedenkenswerte und vielfach praktizierte Methode ist, das aufwändige Teil in zwei oder mehrere einfache bzw. kleinere Einheiten aufzuteilen, sodass deren Fertigung mit den üblichen Vorgaben wesentlich erleichtert wird. Es muss lediglich von Anfang an dafür gesorgt werden, dass diese kleineren Einheiten wieder zu einem Ganzen zusammengefügt werden können. (Beispiele auf S. 173)

Der *Aufbau der keramischen Bauteile in Modulbauweise* bietet in vielen Fällen auch bezüglich der Kombination wirtschaftlicher Herstellungsverfahren, der Erleichterung der Qualitätssicherung, der Steigerung der Beanspruchbarkeit, der Reduzierung von thermischen Spannungen u. a. m. Vorteile. Die 4 bis 5 m hohen Isolatoren für 550 kV (Großporzellan) werden z. B. aus vorgefertigten Einzelteilen zusammengeklebt oder zusammenglasiert.

Für das Fügen von gleichen Materialien (Keramik-Keramik) werden verschiedene Techniken in der Praxis bereits erfolgreich eingesetzt:

- Garnieren  
(Zusammensetzen von Einzelteilen im Grünzustand etc.)
- Laminieren  
(schichtweiser Aufbau)
- Zusammensintern  
(Welle und Rotor bei einigen Ausführungen des Turboladerrotors etc.)
- Kleben
- Löten

### 7.3 Wirtschaftlichkeit

#### 7.3.1 Prinzipielle Bauteilkosten

Die Herstellkosten eines Bauteils aus Technischer Keramik setzen sich folgendermaßen zusammen:

- Materialkosten,
- Formgebungskosten,
- Endbearbeitungskosten,
- Brennkosten,
- Prüfkosten und
- Allgemeinkosten.

Die Materialkosten sind vom verwendeten Werkstoff abhängig und in den meisten Fällen vergleichsweise gering. Mit steigenden Anforderungen an die Eigenschaften der Keramiken können aber auch die Rohstoffpreise wegen der dann benötigten hohen Reinheitsgrade und der definierten reproduzierbaren Pulvereigenschaften besonders bei größeren Bauteilen einen deutlichen Einfluss auf die Gesamtkosten nehmen.

Bei Einzelstücken oder kleinen Stückzahlen (Kleinserien) sind auch die Formgebungskosten nicht unerheblich. Dies erklärt sich daraus, dass hier häufig in vielen Einzelschritten manuell oder lediglich teilautomatisiert gefertigt wird.

Falls Hartbearbeitung notwendig ist, haben die Endbearbeitungskosten oft einen dominierenden Einfluss.

Bei geometrisch komplizierten, hoch belasteten Teilen mit vielen Prüfmaßnahmen und geforderten Eigenschaftszertifikaten stellen die Prüfkosten unter Umständen einen merklichen Anteil an den Gesamtkosten dar.

#### 7.3.2 Bauteilkosten in der Serie

Die Fertigungskosten in der Serie hängen stark von den technologisch notwendigen Fertigungsschritten und von der stückzahlabhängigen

Automatisierung ab. Jüngere Entwicklungen zeigen z. B. wesentliche Fortschritte bei der Hartbearbeitung und damit ähnliche Voraussetzungen wie bei der Metallverarbeitung. Auch für Hochleistungskeramik gibt es weitgehende Kostenoptimierung zum Nutzen der Anwender.

### 7.3.3 Wirtschaftlichkeit im System

In der Regel sollte auch der Zusatznutzen berücksichtigt werden, den keramische Bauteile in der Gesamtkostenstruktur bewirken.

- Keramik macht manche technische Forderung erst möglich und bringt mit dem Innovationssprung einen Wettbewerbsvorteil.

Die erhöhte Lebensdauer und die verbesserte Zuverlässigkeit bringen bei

- Produktionsmaschinen deutliche Einsparungen:
  - Beschaffung von weniger Ersatzteilen,
  - weniger Reparaturaufwand und
  - weniger Stillstandszeiten.
- Gebrauchsgütern:
  - weniger Reklamationen und
  - reduziertes Haftungsrisiko.

## 7.4 Festigkeitsauslegung

Hersteller und Anwender beurteilen die mechanische Belastbarkeit keramischer Bauteile derzeit auf vier Wegen und zwar

1. entsprechend der Erfahrung (intuitives Wissen),
2. mit der analytischen Berechnung der Spannungsverteilung oder
3. der numerischen Berechnung der Spannungsverteilung, aber
4. auch mit der Berechnung der Spannungsverteilung und darauf basierend mit der örtlichen Verteilung der Ausfallwahrscheinlichkeit mittels statistischer Methoden.

Der Aufwand für die Festigkeitsauslegung eines Bauteils steigt von 1. nach 4. an. Gleichzeitig jedoch steigt der Nutzungsgrad der Eigenschaften des Werkstoffs, wodurch u. U. bestimmte technische Lösungen erst möglich werden.

Die Auslegung keramischer Bauteile für die Langzeitanwendung bzw. Ermüdungsbeanspruchung kann nach den gleichen Verfahrensweisen durchgeführt werden. Da jedoch das Versagen dieser Werkstoffe meist auf eine Rissinitiierung und Risswachstumsvorgänge zurückführbar ist, ist besonders die Anwendung der bruchmechanischen Methode in Verbindung mit numerischen Rechenverfahren und statistischen Versagensmodellen zu empfehlen.

Für viele, weniger sensible Anwendungen werden in der Praxis entsprechend intuitivem Wissen und überschlägigen Berechnungen sowohl die Materialien, wie auch die Betriebsbelastungen beurteilt und dementsprechend die Bauteile ausgelegt. Das intuitive Wissen besteht aus der langjährigen Erfahrung mit der Auslegung keramischer Bauteile einerseits und mit dem Betriebsverhalten andererseits. Aus diesen Erfahrungen entstanden einige Grundregeln für die Auslegung von keramischen Werkstoffen (z. B. Druckspannungen unschädlich, Zugspannungen kritisch, Kerben kritisch, Zwangsspannungen vermeiden etc.). Eine zahlenmäßige Festlegung findet dabei jedoch nicht statt.

## 7.5 Gestalten von Bauteilen

### 7.5.1 Grundregeln

- **Einfache Formen und fertigungsgerechte Vermassung anstreben**
  - Formen dem entsprechenden Formgebungsverfahren des Grünlings anpassen,
  - Formgebung und Sintervorgang erleichtern,
  - komplizierte Formen in mehrere einfache Module auflösen,
  - überspezifizierte Oberflächen und unnötig enge Toleranzen vermeiden.

- **Spannungsspitzen vermeiden**
  - Kerbspannungen minimieren,
  - großflächig Kräfte einleiten,
  - plötzliche Querschnittsveränderungen vermeiden,
  - Ecken und scharfe Kanten vermeiden.
  
- **Zugspannungen minimieren**
  - beanspruchungsgerechte Querschnitte vorgeben,
  - konstruktiv Zug- in Druckspannungen umwandeln,
  - Druckvorspannungen einbeziehen,
  - Krafteinleitung keramikgerecht gestalten.
  
- **Materialanhäufungen vermeiden**
  - auf möglichst gleichmäßige Wanddicken achten,
  - Knotenpunkte auflösen,
  - Querschnittssprünge vermeiden,
  - verdichtungsgerecht gestalten.
  
- **Nachbearbeitung minimieren**
  - Formgebung des Grünlings und Grünbearbeitung mit nur geringen Bearbeitungszugaben für die Nachbearbeitung vorsehen,
  - Grünbearbeitung der Endbearbeitung vorziehen,
  - nur kleine und abgesetzte Bearbeitungsflächen zulassen,
  - nur unbedingt notwendige Anforderungen stellen,
  - bearbeitungsfreie Rundungen und Fasen definieren.
  
- **Beachtung fertigungsspezifischer Besonderheiten**
  - Entformbarkeit erleichtern,
  - Hinterschneidungen vermeiden,
  - günstigste Formgebung für den Grünling auswählen,
  - dünne Wandteile und Stege vermeiden,
  - fertigungsgerechte Bauteilproportionen anstreben,
  - eindeutige Auflage- und Einspannbedingungen für die Nachbearbeitung schaffen.

- Die Besonderheiten bei einzelnen Fertigungsschritten, wie
  - Nass- und Trockenpressen,
  - Strangpressen,
  - Sintern und
  - Glasieren beachten.

### 7.5.2 Möglichkeiten zur Belastbarkeitssteigerung

- **Konstruktive Gestaltung**

- Druckspannungen im keramischen Bauteil sind zu bevorzugen  
erreichbar durch entsprechende
  - Festlegung des Kraftangriffes,
  - Bauteilgestaltung,
  - Füge - und Kontaktstellen.
- Aufbau einer Druckvorspannung für die Kompensation von betriebsmäßigen Zugkräften, z. B. durch
  - Metallumguss der Keramik,
  - Aufschrumpfen von Buchsen/Hülsen auf rotationssymmetrische keramische Teile,
  - Verspannen im Montagezustand,
  - technologische Maßnahmen  
(z. B. Glasieren bei Hochspannungsisolatoren).
- Vergrößerung der Krafteinleitungsfläche, Vermeidung von Spannungsspitzen.
- Großvolumige Teile in mehrere zerlegen (Modulbauweise).  
Beachtung des Volumeneinflusses auf die Festigkeit,  
besonders für Weibull-Modul  $m < 20$ .

- **Änderung des Werkstoffes**

- Werkstoffe mit höherer Festigkeit einsetzen,
- Werkstoff mit größerem  $K_{IC}$ -Wert (großem Risswiderstand) einsetzen,
- Dispersionswerkstoff verwenden  
(z. B. Zirkoniumoxid verstärktes Aluminiumoxid),
- faserverstärkte Werkstoffe einsetzen.

- **Technologische Maßnahmen**

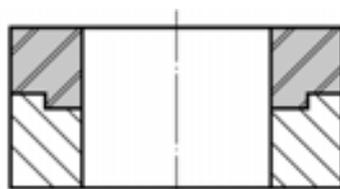
- Bearbeitungsrichtung nur parallel zur maximalen Beanspruchungsrichtung,
- Erzeugung von Druckspannungen im Oberflächenbereich,
- Umwandlungsvorgänge im Kristallgitter steuern und nutzen, insbesondere bei und mit Zirkoniumoxid.

### 7.5.3 Beispiele

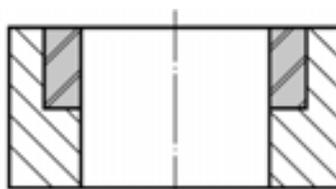
Um die Eigenschaften der Technischen Keramik voll nutzen zu können und daraus wirtschaftliche Bauteile gestalten zu können, sind neben den bekannten Konstruktionsregeln auch werkstoffspezifische Gestaltungsempfehlungen zu beachten. Nachfolgend werden einige Grundregeln mit Beispielen belegt.

Zur Verdeutlichung sind die Schnitte durch keramische Bauteile grau gekennzeichnet

#### 7.5.3.1 Einfache Formen anstreben

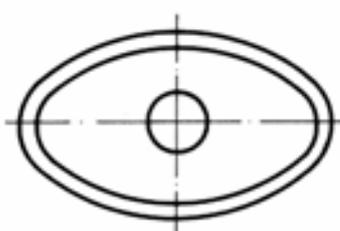


ungünstig

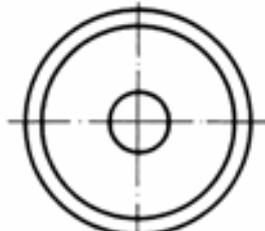


günstig

- Absätze nach Möglichkeit vermeiden

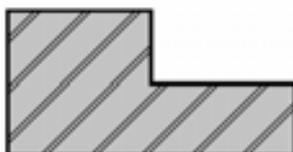


ungünstig

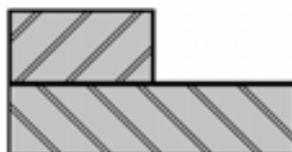


günstig

- ovale Teile vermeiden



ungünstig



günstig

- Modulbauweise bevorzugen

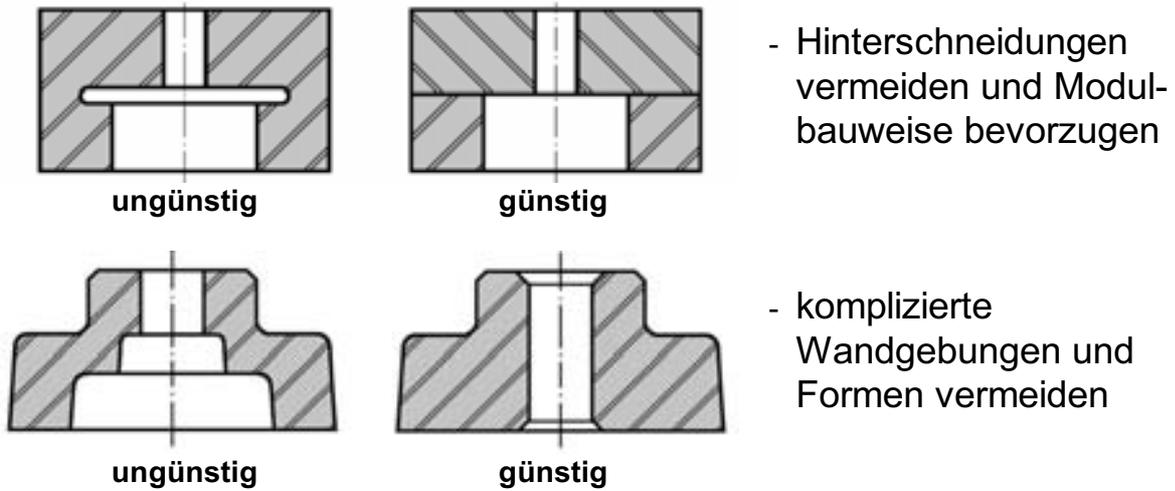
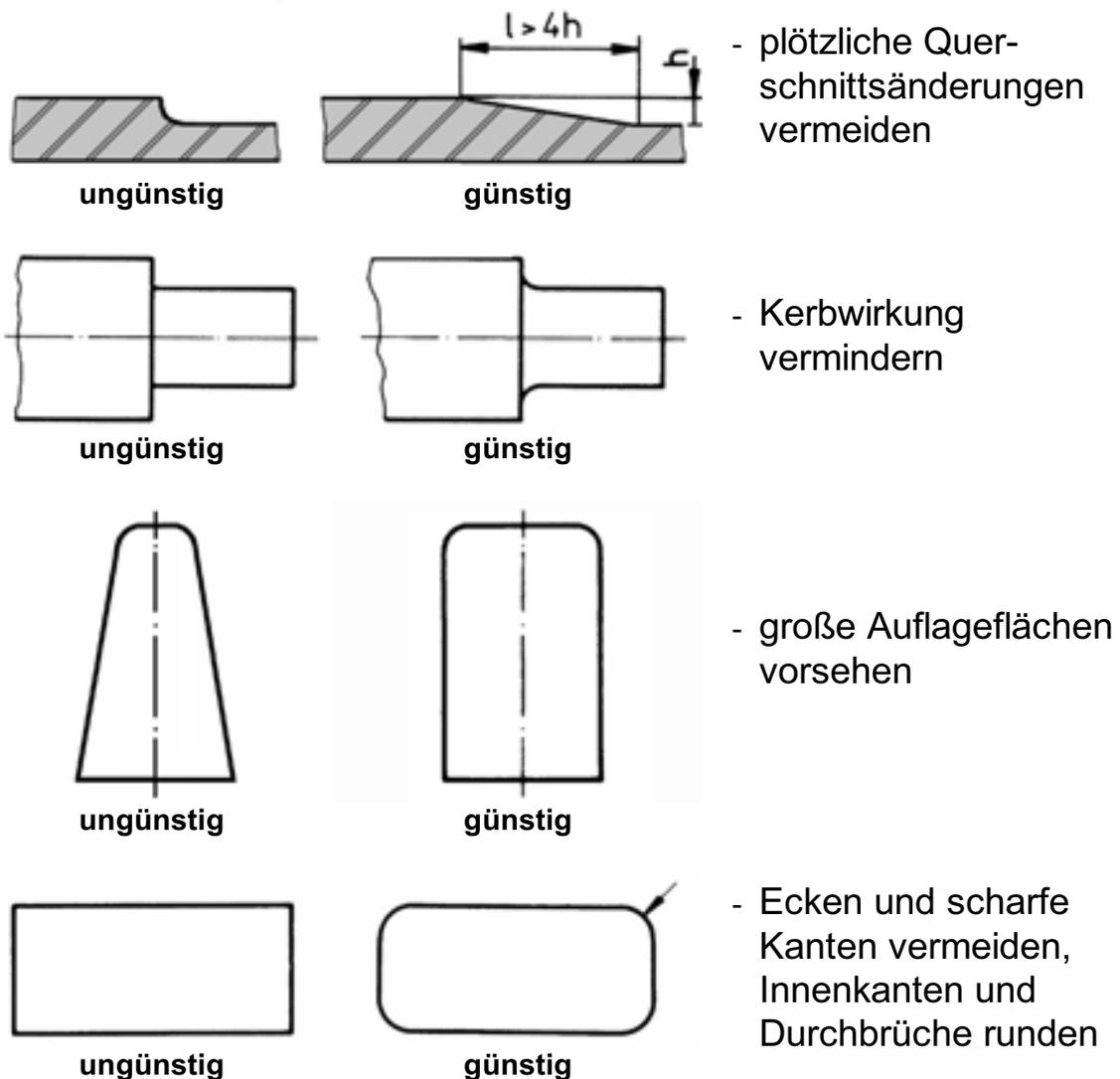
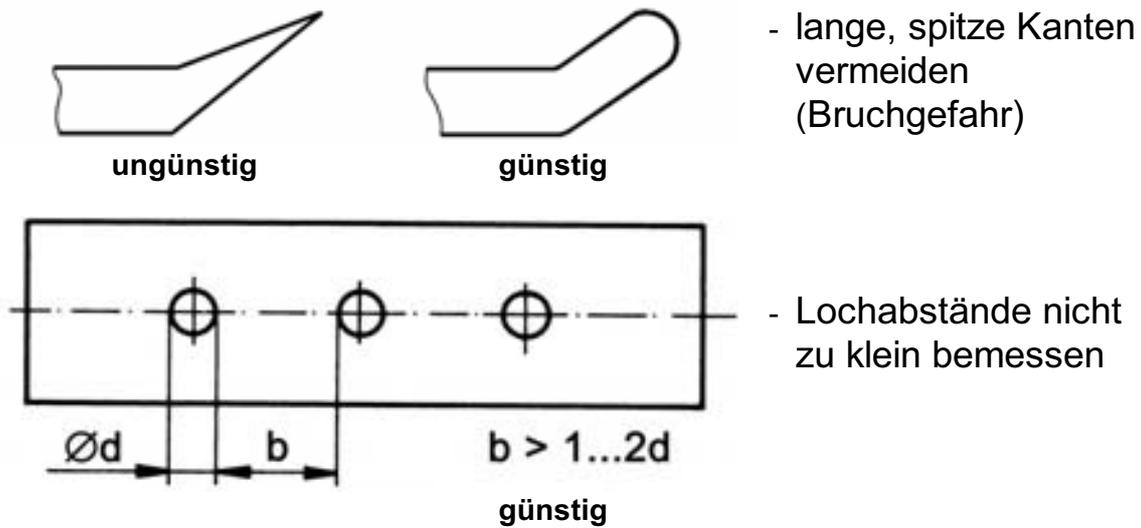


Bild 131–135: Einfache Formen anstreben

## 7.5.3.2 Spannungsspitzen vermeiden



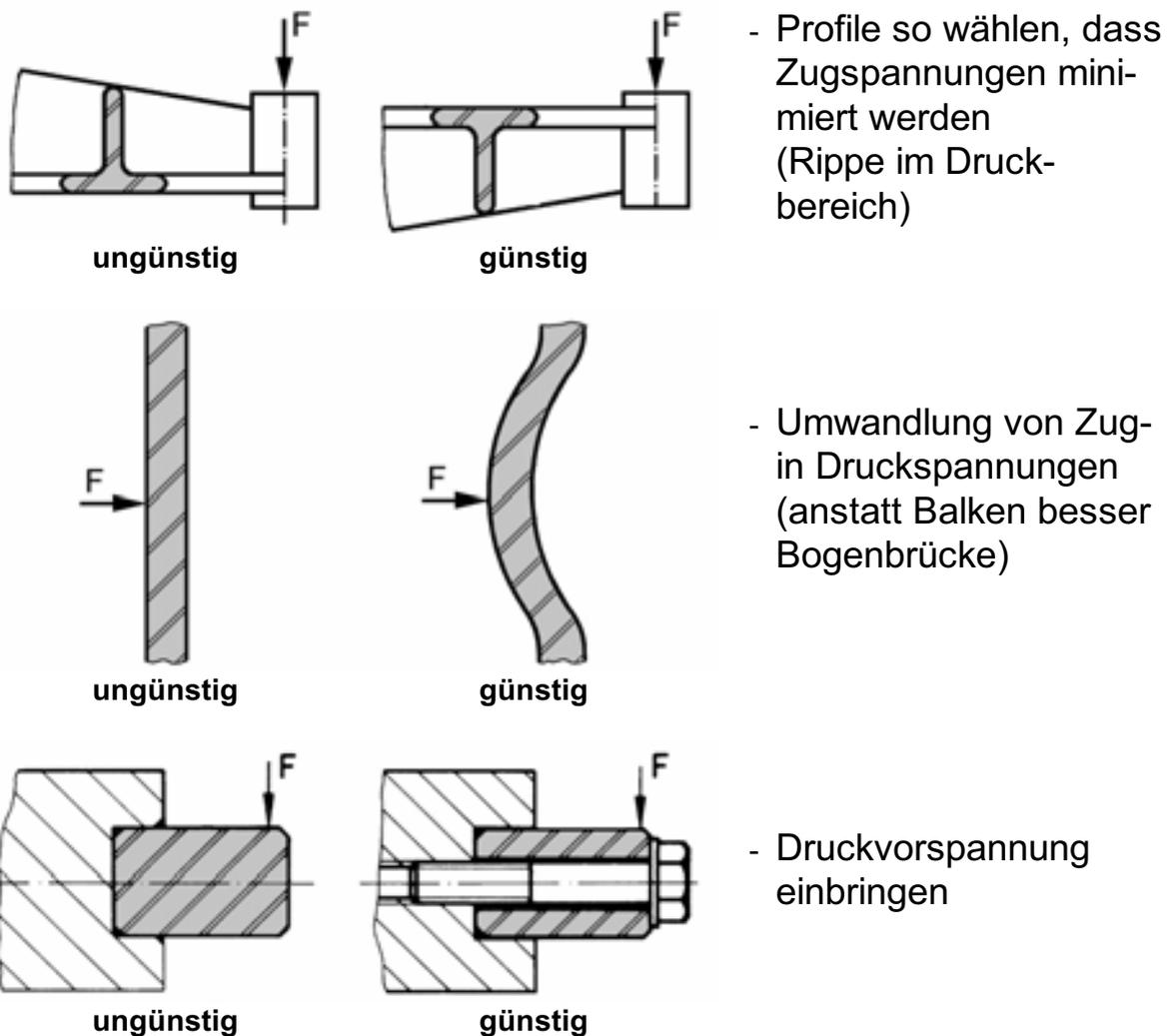


- lange, spitze Kanten vermeiden  
(Bruchgefahr)

- Lochabstände nicht zu klein bemessen

Bild 136–141: Spannungsspitzen vermeiden

### 7.5.3.3 Zugspannungen minimieren



- Profile so wählen, dass Zugspannungen minimiert werden  
(Rippe im Druckbereich)

- Umwandlung von Zug- in Druckspannungen  
(anstatt Balken besser Bogenbrücke)

- Druckvorspannung einbringen

Bild 142–144: Zugspannungen minimieren

### 7.5.3.4 Materialanhäufungen vermeiden

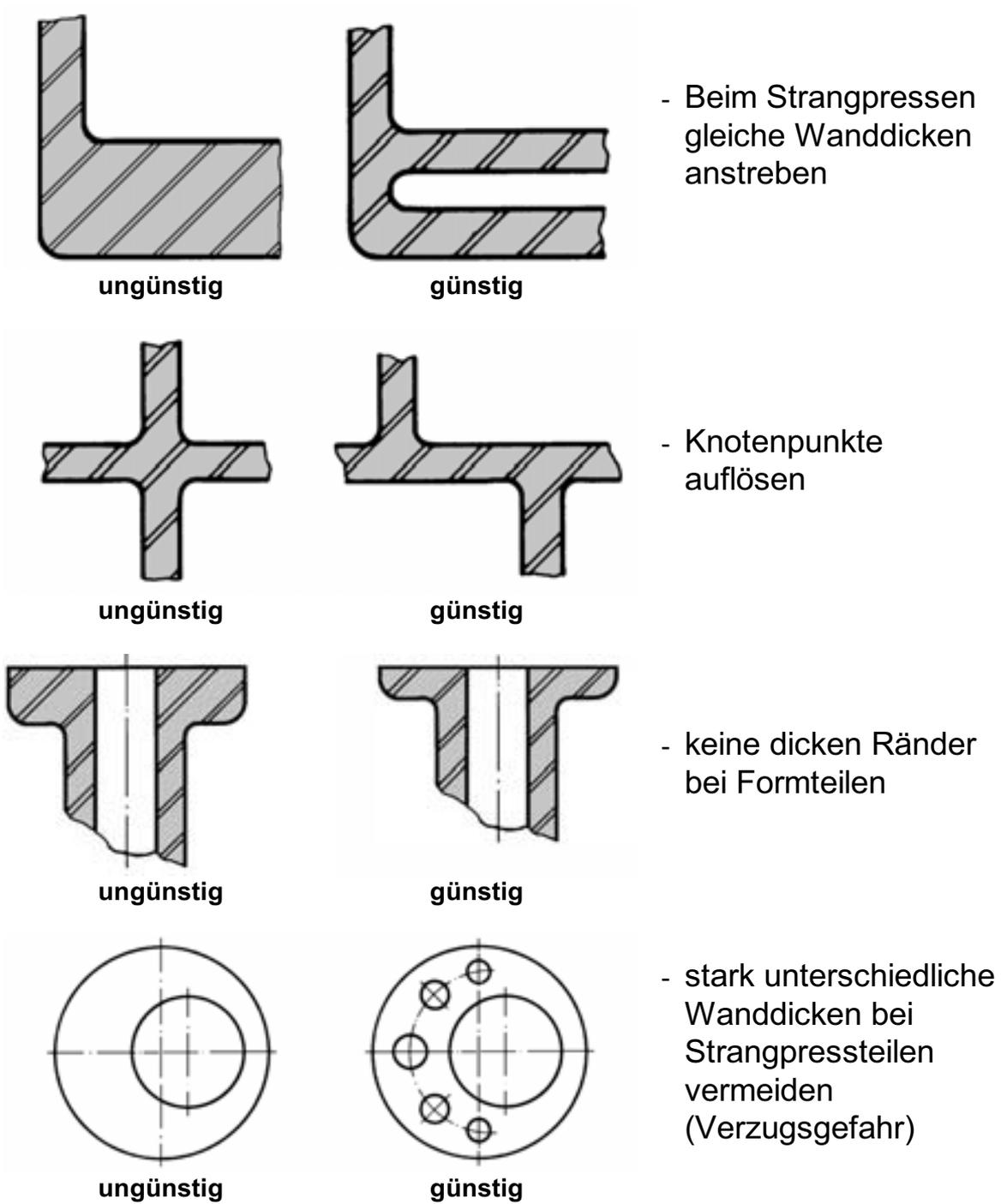
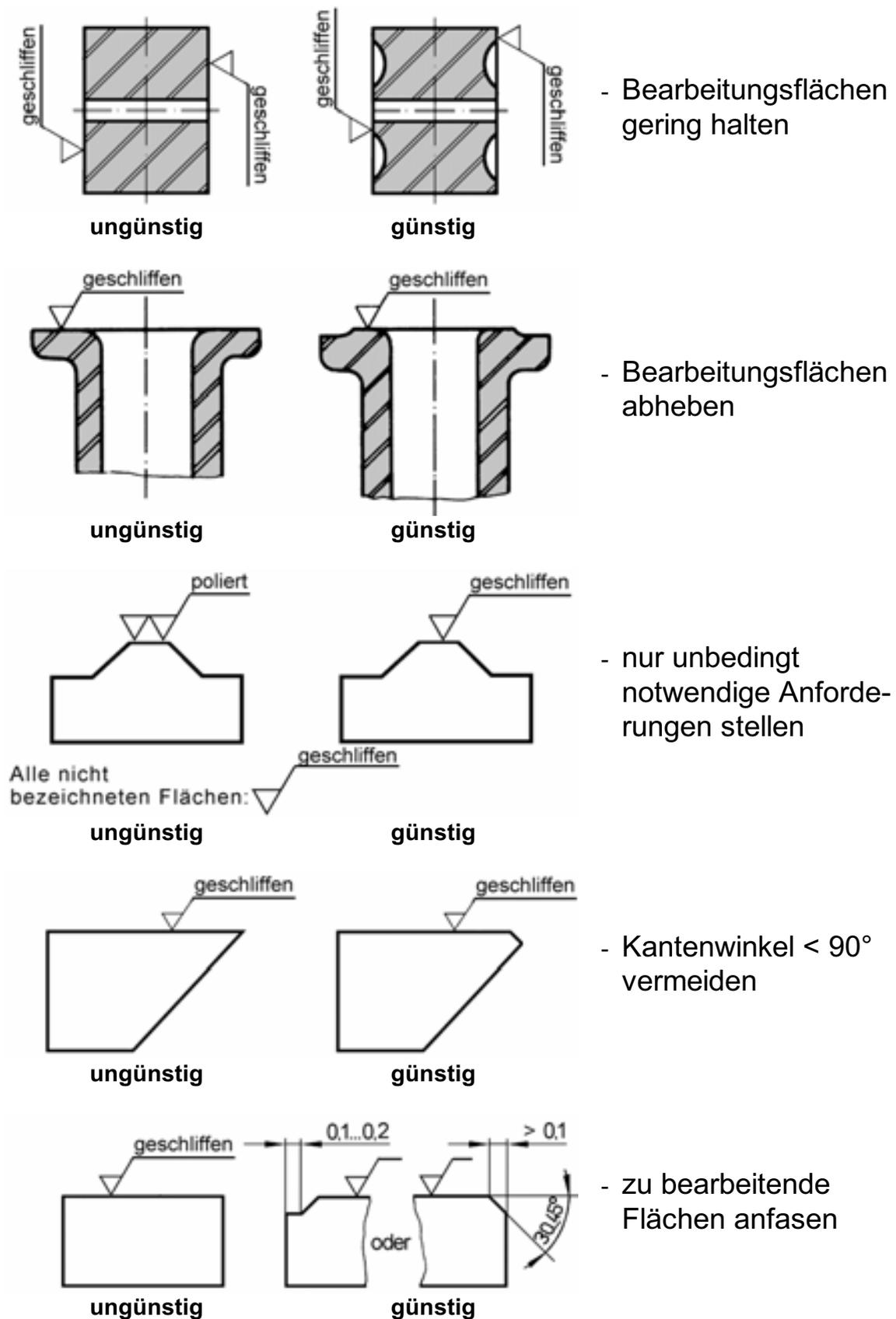
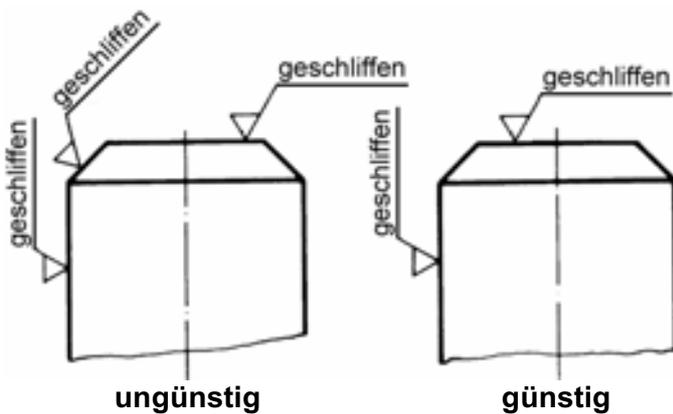


Bild 145–148: Materialanhäufungen vermeiden

### 7.5.3.5 Nachbearbeitung minimieren

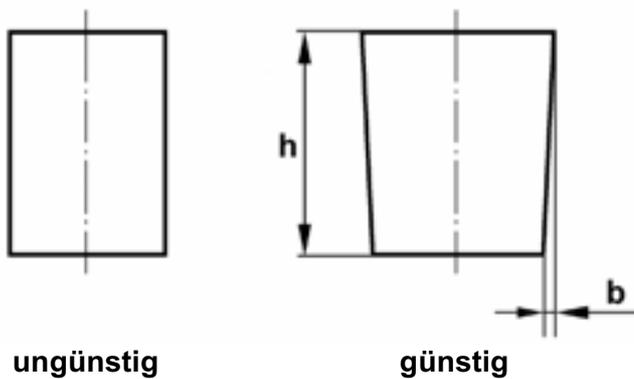




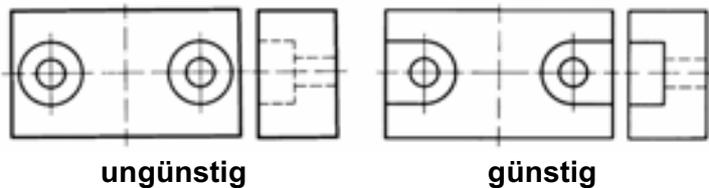
- Fasen so bemaßen, dass die Facette nicht bearbeitet werden muss

**Bild 149–154:** Nachbearbeitung minimieren

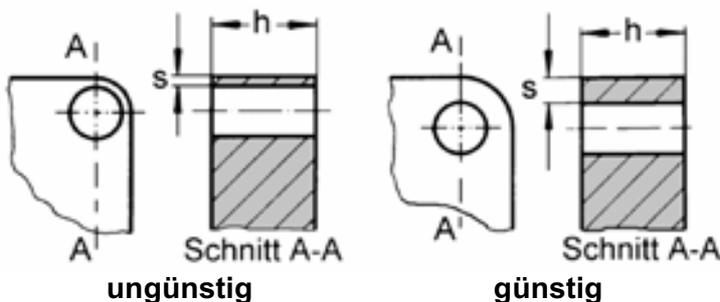
### 7.5.3.6 Fertigungsspezifische Besonderheiten



- Konizität mit  $b \approx 0,005 h$  zum Ausformen vorsehen (nicht gültig für isostatisches und Strangpressen)



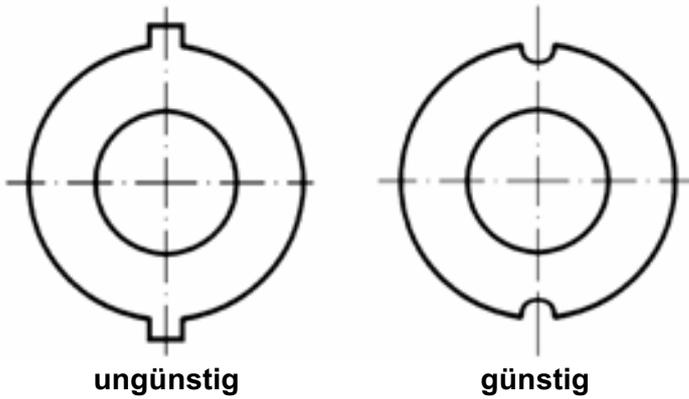
- Versenkungen am Rand öffnen (Rissbildung)



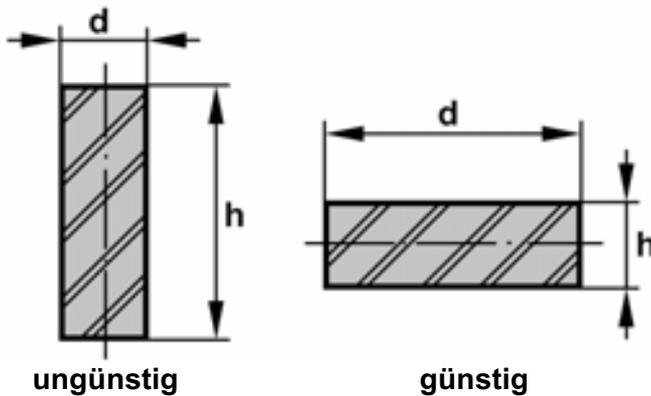
- Randabstand von Bohrungen ausreichend groß wählen
- Verhältnis  $s/h$

*Beispiele:*

h [mm]	s [mm]
< 10	$\frac{1}{4} h$ ( $s \geq 1\text{mm}$ )
10 - 20	$\frac{1}{5} h - \frac{1}{6} h$
> 20	< $\frac{1}{6} h$

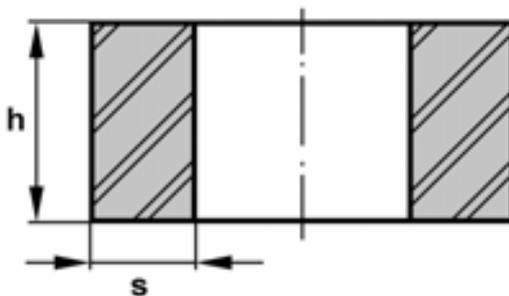


- hervorragende Formelemente mit kleinem Querschnitt vermeiden



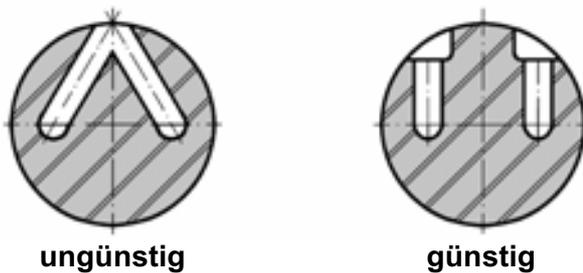
- Beschränkung der Bauteilhöhe bei einachsigen Pressen

$h/d < 6$	möglich
$h/d < 3$	günstig

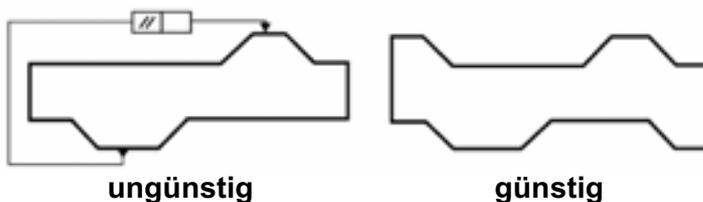


- Gewährleistung einer Mindestwandstärke

$h/s > 8$	Strang-, isostatisches Pressen
-----------	--------------------------------

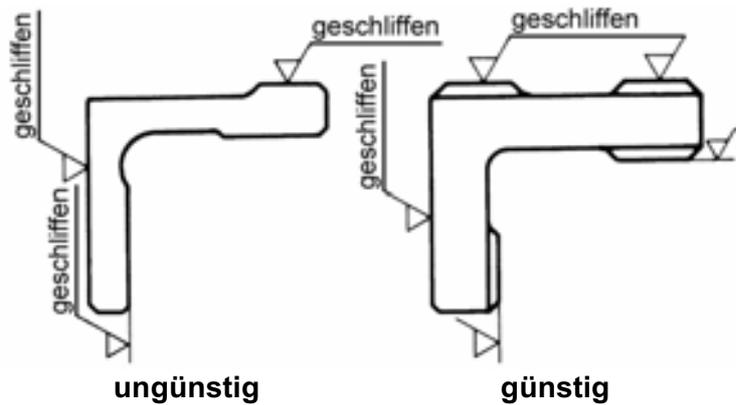


- seitliche Löcher dürfen sich nicht überschneiden
- seitliche Löcher vermeiden



- Gewährleistung fertigungstechnischer Parallelitäten

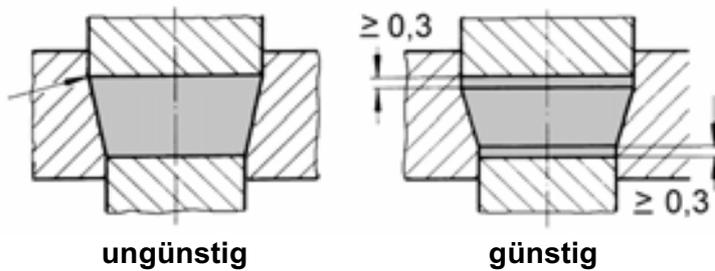
## Konstruieren



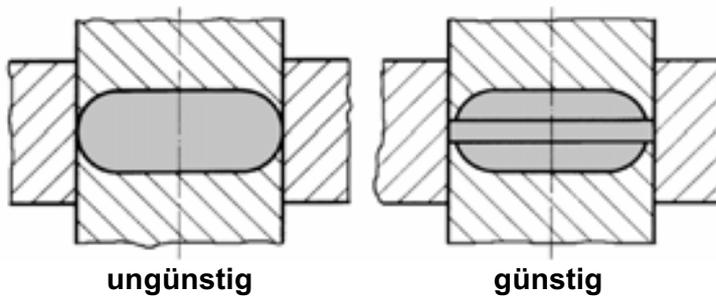
- Bei Winkelteilen dicke Schenkel, reduzierte Bearbeitungsflächen und eindeutige Auflagen schaffen

**Bild 155–163:** Beachtung fertigungsspezifischer Besonderheiten

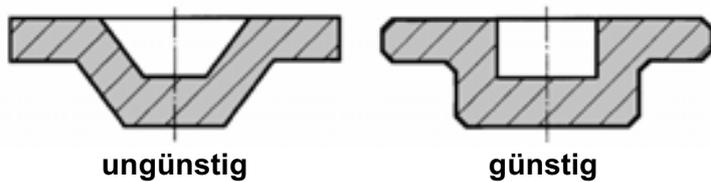
- *Besonderheiten beim Nass- und Trockenpressen*



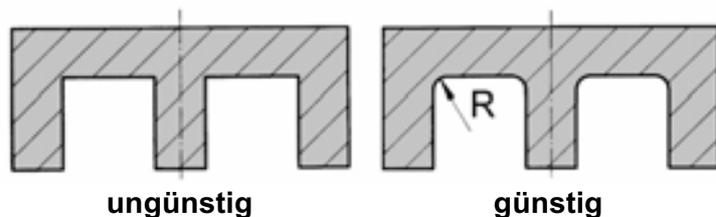
- konisch verlaufende Teile vermeiden (zylindrische Ansätze ergeben gute Kanten und sind werkzeugschonend)



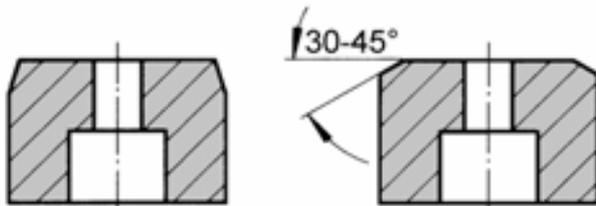
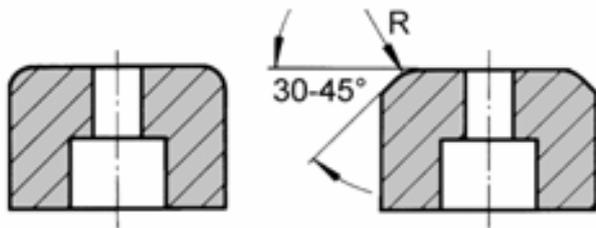
- scharfe, aufeinander stoßende Stempel sind nicht anwendbar, zylindrische Fläche mit kleinem Absatz einfügen



- geringe/keine Schräge liefert dichteres Gefüge

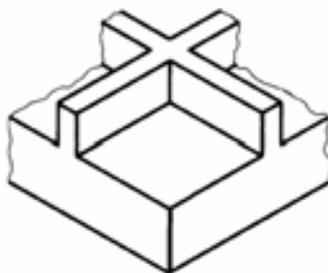


- scharfe Kanten vermeiden

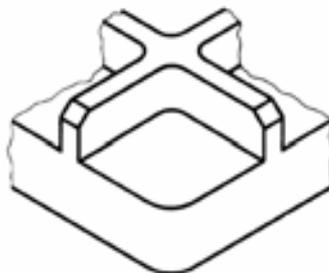


ungünstig

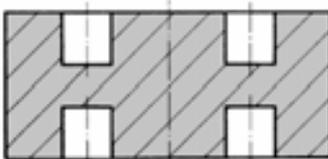
günstig



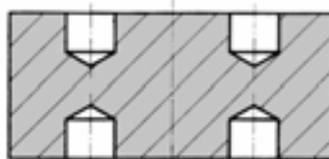
ungünstig



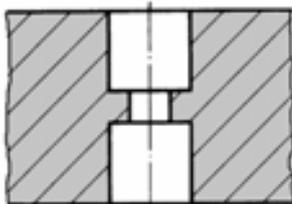
günstig



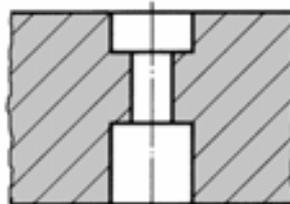
ungünstig



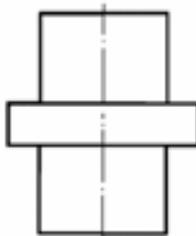
günstig



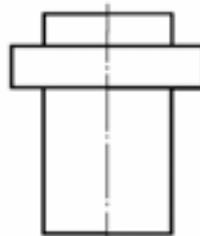
ungünstig



günstig



ungünstig



günstig

- abgerundete oder spitzwinklige Körperkanten vermeiden

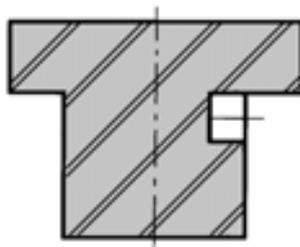
- scharfe Ecken an Schnittpunkten von Stegen und scharfe Kanten an Rippen vermeiden (Rissgefahr und Bruchanfall)

- ebene Böden in Sacklöchern vermeiden (Überpressungen)

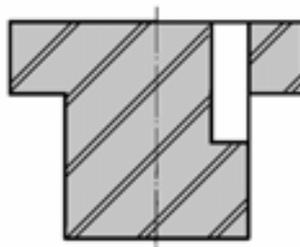
- geringe obere Einsenktiefe und ausreichende Wandstärke ergibt Böden ohne Risse und mit homogener Dichte

- Überpressen von Bund vermeiden, Einpressung von oben gering halten, um gleichmäßige Dichte zu erhalten

## Konstruieren

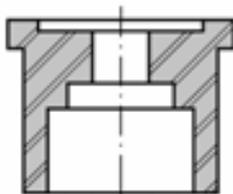


ungünstig

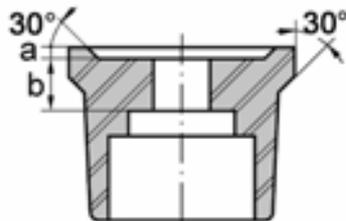


günstig

- seitliche Aussparungen (innen und außen) nach oben durchziehen

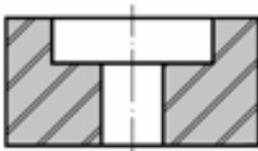


ungünstig

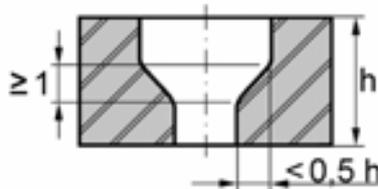


günstig

- abgerundete bzw. abgeschrägte Kanten lassen sich besser auspressen; Bodestärke  $b$  groß halten; Aussparung  $a$  an der Oberseite möglichst nur 0,5 bis 1 mm tief

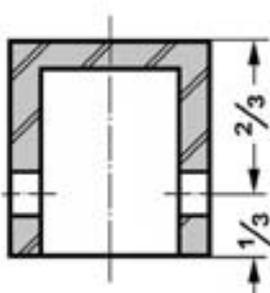


ungünstig

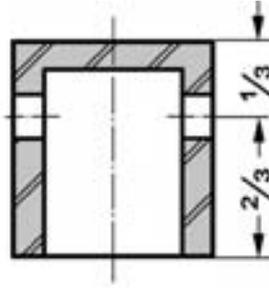


günstig

- Übergänge nach Möglichkeit abschrägen



ungünstig



günstig

- seitliche Bohrungen in den oberen Bauteilbereich legen (einfachere Herstellung durch Schieber)



ungünstig

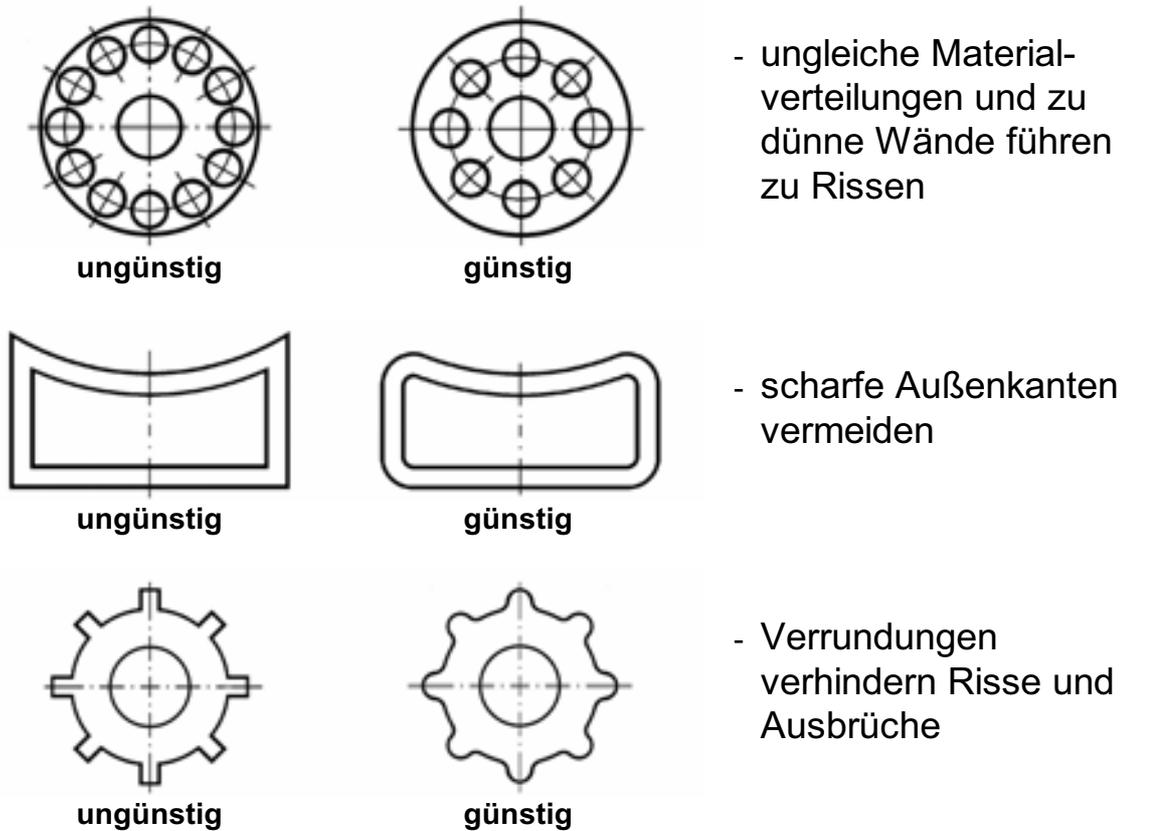


günstig

- große, freistehende Wände und dünne Wände vermeiden (Verzugsgefahr)

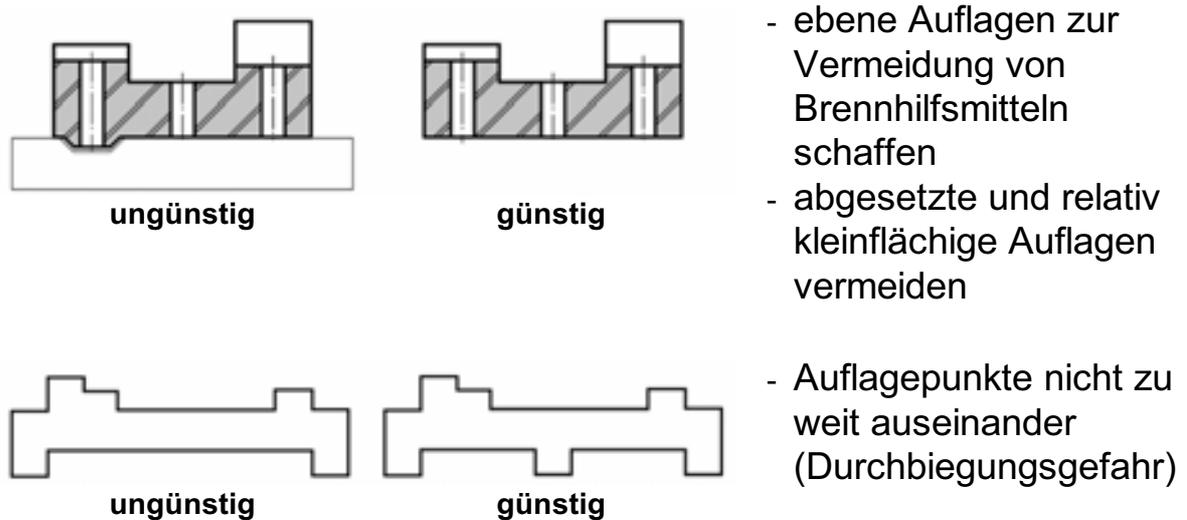
**Bild 164–177:** Beachtung fertigungsspezifischer Besonderheiten für das Nass- und Trockenpressen

- *Besonderheiten beim Strangpressen*



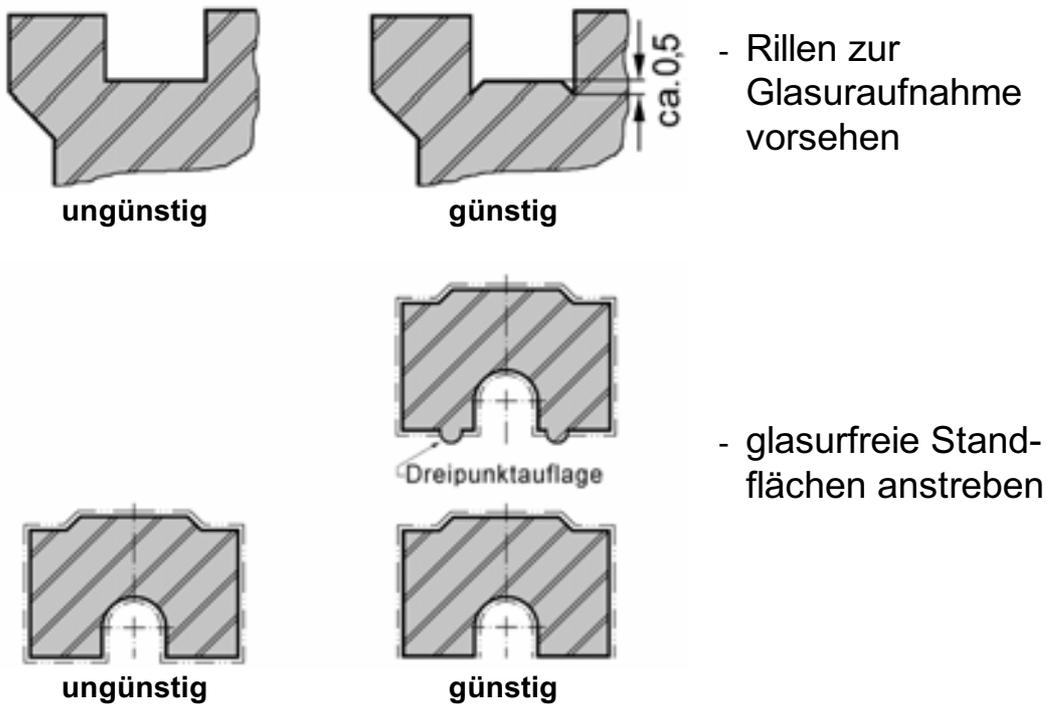
**Bild 178–180:** Beachtung fertigungsspezifischer Besonderheiten für das *Strangpressen*

- *Besonderheiten beim Sintern*



**Bild 181–182:** Beachtung fertigungsspezifischer Besonderheiten für das *Sintern*

- *Besonderheiten beim Glasieren*



**Bild 183–184:** Beachtung fertigungsspezifischer Besonderheiten für das Glasieren

## 7.6 Zusammenfassung wichtiger Leitideen

- Das Konstruieren mit keramischen Werkstoffen erfordert eine grundlegend andere Vorgehensweise als bei Konstruktion mit Metall. Es sind andere Konstruktionsprinzipien, Berechnungs- und Fügeverfahren anzuwenden.
- Bei der Integration keramischer Bauteile in ein metallisches System ergeben sich Forderungen an das keramische Bauteil, an die Konstruktionsumgebung und an die Verbindung zwischen beiden. Oftmals ist ein Kompromiss notwendig, der auch zu Änderungen am metallischen System führt.
- Das Kopieren eines Metallteils bzw. die zeichnungsgenaue Umsetzung in Keramik führt in der Regel nicht zum Erfolg.
- Die Vorteile der Keramik für das System sind weitestgehend zu nutzen und die Schwächen möglichst zu umgehen bzw. ungünstige Beanspruchung zu minimieren.

- Als Folge der chemischen Bindungsverhältnisse, welche die hohe Härte bedingen, sind bei keramischen Werkstoffen im Unterschied zur Konstruktion mit Metall zu beachten:
  - Sprödigkeit,
  - Risse und Risswachstum im Werkstoff,
  - starke Streuung der Festigkeitswerte,
  - geringe Zugfestigkeit,
  - eingeschränkte Formenvielfalt und
  - größere Toleranzen nicht nachbearbeiteter Bauteile.
- Eine Nachbearbeitung ist üblicherweise zeit- und kostenintensiv und deshalb zu vermeiden, zumindest aber stark zu reduzieren.
- Die Zusammenarbeit mit dem Keramikhersteller ist sehr eng zu gestalten, da die Aufgabenstellung einer wirtschaftlichen und technologischen Realisierung bei Keramik noch anspruchsvoller ist als bei Metallen oder Kunststoff.

Ein Indikator für Kosten ist der Schwierigkeitsgrad der Anforderungen an ein keramisches Bauteil. Dieser kann in fünf Stufen eingeteilt werden. Für ein kostengünstiges Produkt ist daher auch ein geringer Schwierigkeitsgrad anzustreben.

Schwierigkeitsgrad	Forderung an das keramische Bauteil	Entwurf wird entscheidend beeinflusst durch
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe mechanische Belastung</li> <li>• Einsatztemperatur <math>\approx</math> Raumtemperatur</li> </ul>	Formgebungsverfahren (Werkzeugkosten usw.)
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wie 1 +</li> <li>• Maß- und Formtoleranz vorgegeben</li> </ul>	Formgebungsverfahren, Nachbearbeitung (Möglichkeiten und Kosten)
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wie 2 +</li> <li>• Oberflächengüte vorgegeben</li> </ul>	Nachbearbeitung (Möglichkeiten und Kosten)
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• größere mechanische Belastung</li> <li>• und/oder thermisch induzierte Belastung</li> </ul>	Spannungsverteilung im Bauteil bei Belastung
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wie 4 +</li> <li>• Verbindung mit anderen Bauteilen</li> </ul>	Formgebung und Nachbearbeitung (Maß- und Formtoleranz, Kosten) Spannungsverteilung im Verbund bei Belastung

**Tabelle 24:** Schwierigkeitsgrad

# 8 Verbindungs- und Fügechnik

Der Verbindungs- und Fügechnik fällt bei der Integration einer keramischen Komponente in ein technisches System eine ganz entscheidende Rolle zu. Es muss gelingen, das keramische Bauteil für alle Betriebssituationen zuverlässig ins Gesamtsystem zu integrieren, damit die besonderen Eigenschaften zum Tragen kommen, wegen denen man eine Komponente aus keramischen Werkstoffen anfertigen oder einsetzen möchte.

Die Gesamtkonzeption muss ggf. unter besonderer Berücksichtigung der Verträglichkeit des keramischen Teils mit seiner Umgebung neu überprüft werden. Meist werden die Anpassungsschwierigkeiten durch unterschiedliche thermische Längenausdehnung (AK) und unterschiedliches elastisches Verhalten (E-Modul) der Keramik und den sie umgebenden, meist metallischen Komponenten verursacht. Im Prinzip steht eine Vielzahl von Fügechniken zur Verfügung.

Keramik lässt sich grundsätzlich mit sich selbst und mit jedem anderen Werkstoff lösbar und unlösbar verbinden. Zur zuverlässigen Verbindung von keramischen Komponenten untereinander und mit anderen Werkstoffen können stoff-, form- und kraftschlüssige Fügechniken in Betracht gezogen werden.

## 8.1 Grundsätze

Maßgebend für die Wahl der Fügechnik sind der Partnerwerkstoff und die Anforderungen, die an die Verbindung gestellt werden.

Keramikgerechtes Design heißt z. B. in Verbindungen mit Metall, Keramik möglichst auf Druck zu belasten und Zug- und Biegebeanspruchungen in das Metall zu verlegen.



**Bild 185:** Einflussgrößen auf Verbindungen

In allen Fällen steht das Verhalten der Funktionseinheit im Vordergrund. Die Zuverlässigkeit einer Verbindung gegenüber Überbeanspruchung und Lockerung muss in jedem Herstellungs- und Betriebszustand gewährleistet sein. Die eigentliche Aufgabe des Konstrukteurs besteht darin, die plastischen, elastischen, thermischen und geometrischen Dehnungsunterschiede zwischen der Keramikkomponente und ihrer Umgebung beanspruchungsbegrenzt aufeinander abzustimmen. Die Eignung einer Fügetechnik oder einer Kombination verschiedener Techniken entscheidet sich am konkreten Einzelfall. Fügen ist mehr als die Anpassung von Ausdehnungskoeffizienten und Elastizitätsmoduli. Das Zusammenwirken von Stoffdaten, Bauteilausführung und Kontaktflächen erfordert eine enge, multidisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Technologen, Fertigungstechnikern und Konstrukteuren, insbesondere zur Überwindung der Verbundeigenspannungen.

Bei der Gestaltung der Verbindungen sollte der Konstrukteur werkstoffgerecht vorgehen und folgende Grundsätze beachten:

- Vermeide Spannungsspitzen und Punktlasten durch
  - große Krafteinleitungsflächen,
  - parallele Kontaktflächen,
  - u. U. elastische Zwischenlagen und
  - Kraftfluss ohne scharfe Umlenkung.
- Vermeide Zugspannungen im Keramikteil und bevorzugte Beanspruchung auf Druck durch
  - Pressverbindungen (Keramikteil als Innenteil),
  - Druckvorspannungen und
  - entsprechend angeordnete Krafteinleitungsstellen.
- Vermeide Schlag- und Stoßbeanspruchung durch
  - vergrößerte Krafteinleitungsstellen,
  - verringerte Belastung und
  - zusätzliche federnde, elastische und/oder dämpfende Elemente.

- Vermeide Zusatzbeanspruchung<sup>22</sup> durch behinderte Wärmedehnung durch Verwendung von
  - Werkstoffen mit ähnlichen Wärmedehnungskoeffizienten,
  - federnden oder elastischen Elementen und
  - Luftspalten.
- Verformungsdifferenzen infolge unterschiedlicher Elastizitätsmoduli ausgleichen (sofern sie zur weiteren Belastung des Keramikteils führen) durch
  - federnde oder elastische Zwischenelemente und
  - Abstimmung der Steifigkeiten.
- Formschluss/Kraftschluss
  - Formschluss vermeidet weitere Verbindungselemente.
  - Kraftschluss kompensiert Probleme bei unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und unterschiedlichen Steifigkeiten.

## 8.2 Verfahren

Das stoffschlüssige Fügen *vor dem keramischen Brand* im grünen oder weißen Zustand setzt einen ähnlichen keramischen Aufbau der Module voraus und erfolgt mittels werkstoffschlüssiger Verfahren (Garnieren und Laminieren) beim Keramikhersteller. (vgl. Modulbauweise, S. 192)

---

<sup>22</sup> Bei Keramik/Metallverbindungen ist im Allgemeinen der AK des Metalls deutlich größer als der der Keramik (siehe Werkstofftabellen, S. 263–273). Mit steigender Temperaturdifferenz zwischen der Füge- und der Anwendungstemperatur entstehen aufgrund von behinderten Verformungen ansteigende Spannungen im Bereich der Fügestelle. Dies gilt für alle Verbindungstechniken gleichermaßen. Können diese Spannungen nicht durch plastische Verformungsvorgänge oder durch formelastische Glieder abgebaut werden, führen sie zum frühzeitigen Versagen.

Da die keramischen Werkstoffe kein plastisches Verformungsvermögen zum Abbau von Spannungsspitzen besitzen, muss diese Aufgabe an anderer Stelle übernommen werden. Durch gezielte Wahl des Fügepartners (AK-angepasste Metalllegierungen, ferritische anstelle von austenitischen Stählen etc.), eine Optimierung der Geometrie der Fügeverbindung (Wandstärken, Übergangsbereich zwischen der Fügestelle und Luftspalt) und geeignete Hilfswerkstoffe (Lot, Kleber, formelastische Ausgleichsglieder etc.) muss versucht werden, die Zugspannungen in der Keramik möglichst klein zu halten bzw. abzubauen. Hierbei müssen auch die Betriebsbedingungen besonders berücksichtigt werden.

Zu den stoffschlüssigen Verbindungstechniken gehören technisch etablierte Verfahren, wie

- Klebeverbindung mit Thermoplasten, Elastoplasten und Duroplasten (*Befestigung von Verschleißschutzplatten*),
- Lötverbindungen mit metallischen Loten (*Löten in der keramischen Substrat- und Gehäusetechnik, Auflöten von Pins auf ein Substrat, Lötungen an Gleichrichter- und Thyristorgehäusen und Überspannungsableitern, Verschleißplatten auf Kipphebeln im Kfz-Motor etc.*) und Glasloten oder
- Klebeverbindungen auf keramischer Basis.

Dafür ergeben sich vor allem als Ziele und Arbeitsfelder:

- Anpassung der Kleber und Lote,
- Anpassung der Füge- und Anwendungstemperaturen und
- Reduzierung der Verbundeigenstressungen.

Die kraft- und formschlüssigen Verbindungstechniken nach dem keramischen Brand umfassen:

- Einschrumpfen (*Gleitdichtungen, Presswerkzeuge etc.*),
- Einpressen,
- Um- und Eingießen (*Portliner, keramische Kolbenbodeneinsätze, Befestigungselemente an Isolatoren etc.*),
- Umbördeln,
- Klemmen (*Befestigung von Brennerrohren, Fixierung und Abdichtung von Wärmetauschern, Befestigung von Schneidplatten an Drehstählen bzw. Fräsköpfen etc.*),
- Stecken (z. B. *Bajonettverschluss*) und
- Nieten/Stauchen sowie
- Schrauben (*Befestigung von Brennerrohren, Fixierung und Abdichtung von Wärmetauschern, Befestigung von Schneidplatten an Drehstählen bzw. Fräsköpfen etc.*)

und können die Entwicklung von speziell angepassten Verbindungselementen erforderlich machen.

## Verbindungs- und Fügetechnik

Fügeverfahren	Materialverbindungen Keramik mit			Lösbarkeit	keramische Werkstoffe
	Keramik	Metall	Kunststoff		
Kitten/ Zementieren	+	+		nein	alle
Kleben	+	+	+	nein	alle
Löten nach Metallisierung		+		teilweise	alle
Verbindungs- aktivlöten		+		nein	alle
Verbindungslöten mit Glasloten	+			nein	alle
Schrauben	+	+	+	ja	alle
Stecken		+	+	ja	alle
Klemmen		+		ja	alle
Schnapp- verbindungen		+	+	ja	alle
Garnieren/ Laminieren	+			nein	alle
Eingießen/ Umspritzen		+	+	nein	eingeschränkt
Crimpen/ Bördeln		+		nein	alle
Pressen/ Schrumpfen		+		teilweise	alle
Einvulkanisieren		+		nein	alle

**Tabelle 25:** Fügeverfahren für keramische Bauteile: + = realisierbar

Fügeverfahren	keramische Wirkflächen		Fügevorgang	
	bevorzugte Geometrie	Hartbearbeitung	Zusätze	Zusatzbedingungen
Kitten/ Zementieren	-	-	Schwefelzement, Bleilegierungen, Kitte/Zemente	-
Kleben	-	Auflage- flächen	Klebstoffe (organisch und/ oder anorganisch)	Härtetemperatur, Druck
Löten nach Me- tallisieren	-	Auflage- flächen	a) Weichlote b) Hartlote	a) 200–300 °C b) 500–1.000 °C
Verbindungs- aktivlöten	-	Auflage- flächen	Aktivlote z. B. Ti, Cu z.T. mehrschichtig	spez. Atmos- phäre 600–1.130 °C
Verbindungs- löten mit Glasloten	-	Auflage- flächen	Glaslote	450–1.600 °C z. T. zusätzlich Druck und spez. Atmosphäre
Schrauben	eingegossenes oder geklebtes Gewinde oder durchgehende Verbindung	Auflage- flächen	Schraube, Scheibe, Mutter	Zwischenlage
Stecken	rotations- symmetrisch	Auflage- flächen	-	-
Klemmen	eben oder rotations- symmetrisch	Auflage- flächen	Verbindungs- elemente	elastische und/ oder plastische Zwischenlage
Schnapp- verbindungen	eben oder rotati- onssymmetrisch	-	-	-
Garnieren/ Laminieren	-	-	identischer kera- mischer Schlicker	Sintervorgang, Druck
Eingießen/ Umgießen	Hohlkörper, rund bzw. oval	-	-	Vorwärmen, wenige Werkstof- fe geeignet
Crimpen/ Bördeln	eben oder rotations- symmetrisch	Auflage- flächen	-	-
Pressen/ Schrumpfen	rotations- symmetrisch, Metall außen	Füge- flächen	-	Einpreßkraft/ Erwärmung
Ein- vulkanisieren	-	-	Kautschuk	-

**Tabelle 26:** Kurzcharakteristik von Fügeverfahren

## 8.2.1 Kraft- und Formschluss

Zur Gestaltung von Verbindungen werden einige Grundregeln und einige typische Problemstellungen vorgestellt. Die Keramik ist an der grauen Färbung zu erkennen.

### 8.2.1.1 Spannungsspitzen vermeiden

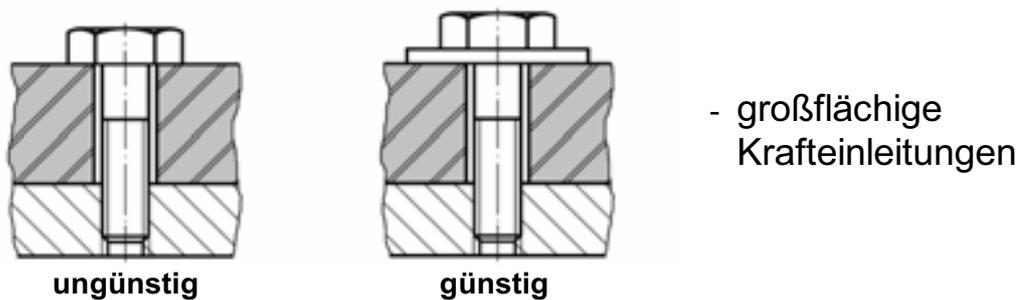
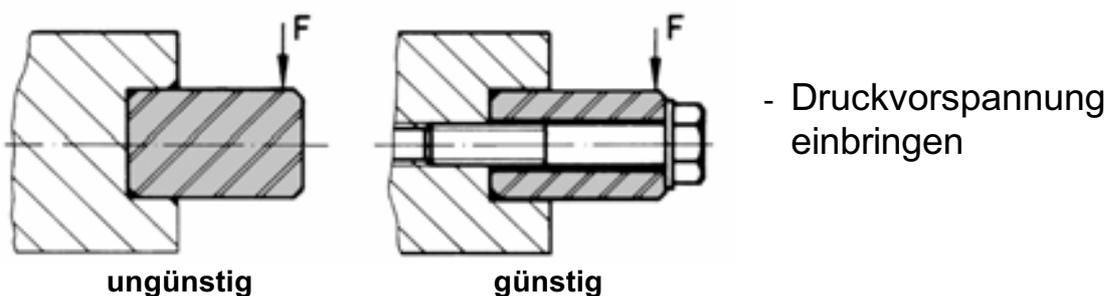
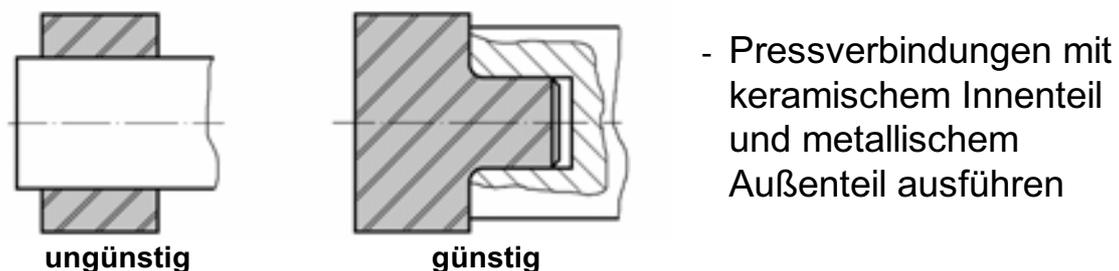
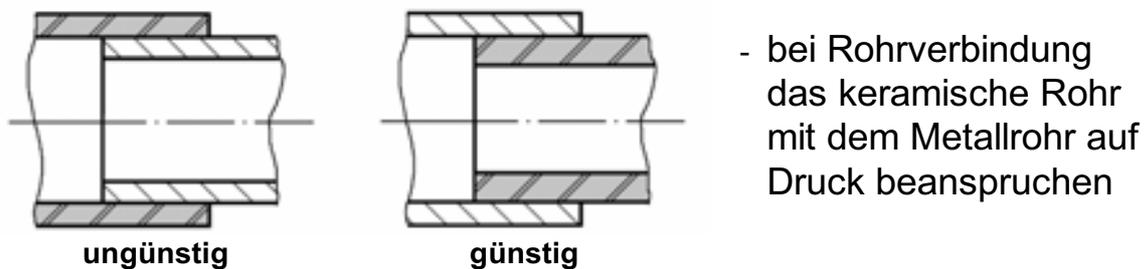
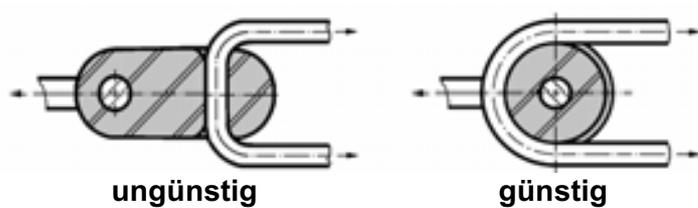


Bild 186: Vermeide Spannungsspitzen und Punktlasten

### 8.2.1.2 Druckbeanspruchung bevorzugen

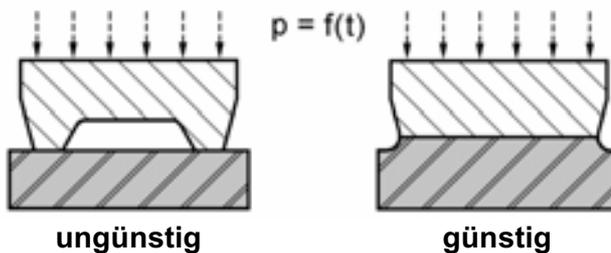




- Kraft in keramische Bauteile so einleiten, dass diese nur auf Druck belastet werden

**Bild 187–190:** Keramikteile bevorzugt nur auf Druck beanspruchen

### 8.2.1.3 Schlagbeanspruchung vermeiden

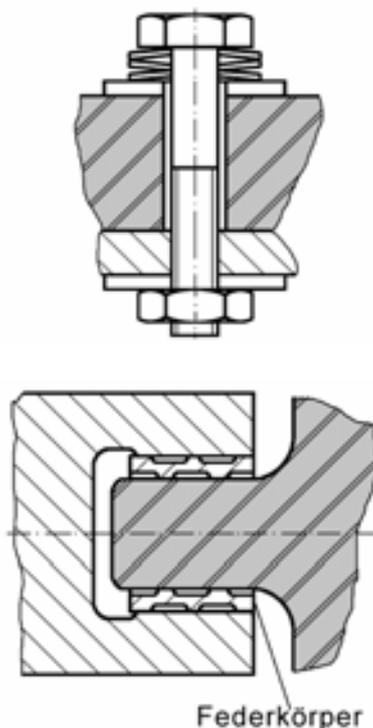


- Krafteinleitungsstellen möglichst groß ausführen

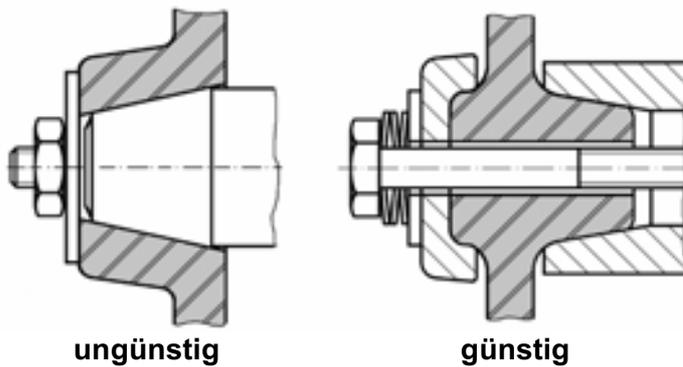
**Bild 191:** Vermeide Schlag- und Stoßbeanspruchung

Weitere Beispiele im Abschnitt 7.5.3.2.

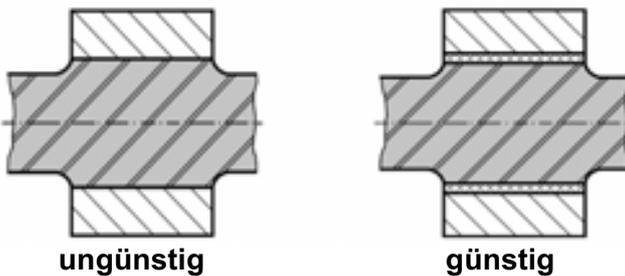
### 8.2.1.4 Wärmedehnung beachten



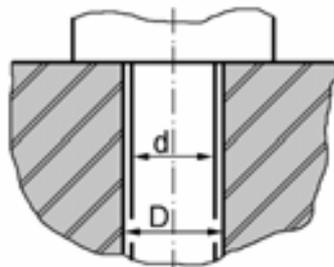
- Dehnung durch elastische Einspannungen kompensieren
  - Tellerfedern vorsehen
  - federnde Verbindungselemente vorsehen



- bei Kegelsitzen Keramik immer auf Druck belasten



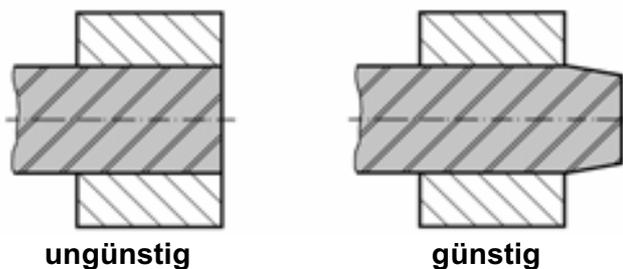
- dämpfende Zwischenlagen einfügen



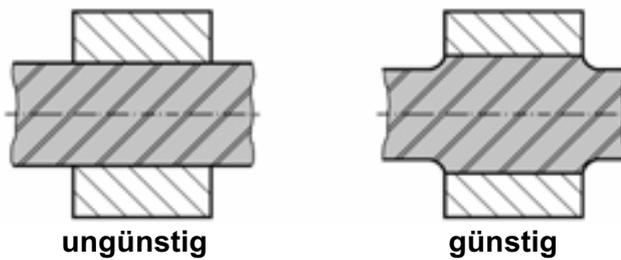
- Spiel zwischen Bauteilen so groß bemessen, dass unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten nicht zum Drängen führen
  - $D > d(\alpha_{ST}\Delta T + 1)$  im Montagezustand

**Bild 192–196:** Zusatzbeanspruchungen durch behinderte Wärmedehnung

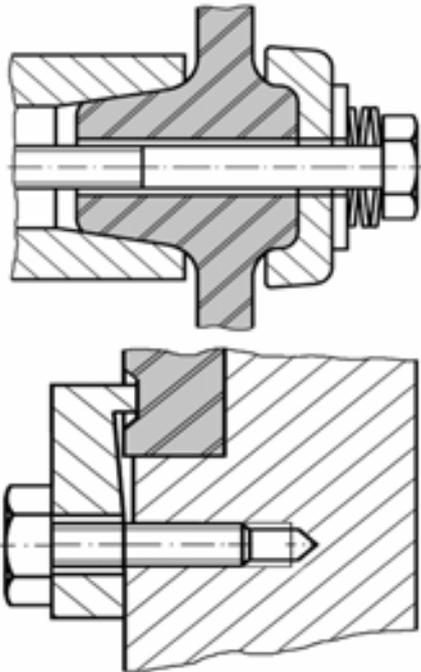
### 8.2.1.5 Schonende Krafteinleitungen



- Bei Welle-Nabe-Verbindungen Eckausbrüche infolge von Spannungskonzentration im Kantenbereich vermeiden



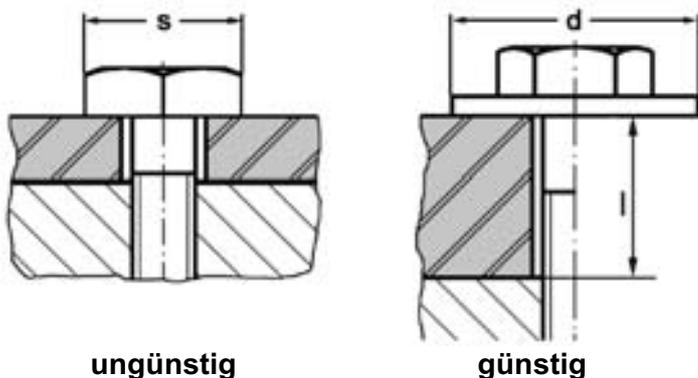
- Kerbwirkungen und scharfe Kraftumlenkung vermeiden



- fliegende Befestigung mit kleiner axialer Bohrung mittels Zuganker oder Schraube
  - o großflächigen Krafteinleitung
  - o Beschränkung auf Druckspannungen
  - o Ausgleich von thermischen Dehnungen durch gefederte Einspannung beachten

Bild 197–200: Schonende Krafteinleitungen

### 8.2.1.6 Kraftflüsse anpassen



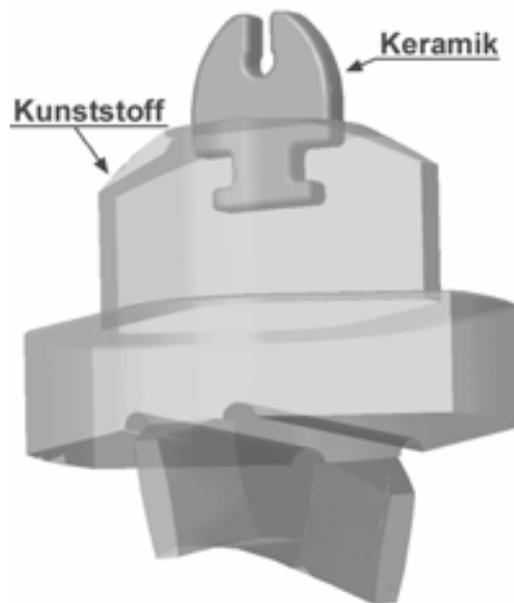
- bei Schraubverbindungen keine dünnen Keramikplatten verschrauben
  - o Sechskantschraube mit Unterlage:  
 $l \geq d > s$

Bild 201: Schonende Krafteinleitungen

### 8.2.2 Umspritzen mit Kunststoff

Die Verwendbarkeit von Kunststoff stößt auf Grenzen, wenn

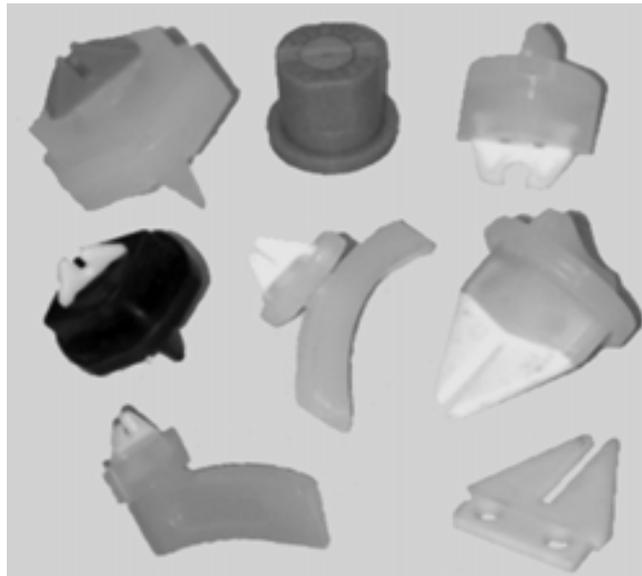
- Reibung auftritt und dadurch Verschleiß erzeugt wird,
- durch höhere Temperaturen die Isolierfähigkeit zurückgeht und
- mit steigenden Temperaturen die mechanische Festigkeit abnimmt.



**Bild 202:** Mit Kunststoff umspritztes Keramikbauteil

Hier bietet sich die Armierung mit Keramik im gefährdeten Bereich an. Dazu wird ein keramisches Einlege-Teil in die Spritzform eingelegt und beim Spritzen des Bauteils mit umspritzt und fixiert. Das Einlege-Teil muss für die notwendigen Toleranzen von 0,01 mm in der Regel hartbearbeitet werden, damit die Kunststoffschmelze beim Umspritzen nicht austreten kann. Die Verankerung der Einlege-Teile wird durch Materialdurchbrüche und hintergriffige Konturen verbessert.

Der Einlege-Verbund bietet eine Verbindung mit relativ hoher mechanischer Festigkeit und vermeidet zusätzliche Belastungen auf die Fügepartner. Insbesondere ist die Fügetechnik für die Materialkombination Polyamid/Keramik erprobt.



**Bild 203:** Changierfadenführer



**Bild 204:** Weitere umspritzte Keramikbauteile

### 8.2.3 Kleben

Kleben gehört zu den herkömmlichen Verbindungsmethoden. Grundsätzlich können durch diese Technik gleiche und verschiedenartige Werkstoffe miteinander verbunden werden. Durch Kleben wird eine stoffschlüssige Verbindung mit flächiger Krafteinleitung erzielt. Dies ist für Keramikteile besonders vorteilhaft, weil Kleben keine ausgeprägten Spannungsspitzen hervorruft, wie sie z. B. bei Schraubenverbindungen vorkommen.

Beim Kleben treten des Weiteren keine oder nur geringe thermische Belastungen auf, die daher keinerlei Einfluss auf die Eigenschaften der Fügepartner ausüben. Weiterhin sind Klebeverbindungen meist gas- und flüssigkeitsdicht und besitzen gute mechanische Dämpfungseigenschaften.

Ein wesentlicher Nachteil von Klebeverbindungen ist ihre begrenzte thermische Belastbarkeit.

### 8.2.3.1 Klebstoffarten

Zu den Klebstoffen für anspruchsvollere Verklebungen (HighTech-Klebstoffe oder Strukturklebstoffe) gehören im Wesentlichen folgende:

- Acrylatklebstoffe,
- Cyanacrylatklebstoffe,
- Epoxidharzklebstoffe,
- Polyurethanklebstoffe,
- Phenolharzklebstoffe und
- Polyesterharzklebstoffe.

Für die Auswahl der Klebstoffe ist eine genaue Definition des Anforderungsprofils der Verklebung wichtig. Daher müssen die Bauteilbeanspruchungen, wie mechanische und thermische Belastungen und evtl. eine mediale Beeinflussung bekannt sein.

Zusätzlich sind die Materialkennwerte der Fügeteile sowie die Oberflächenbeschaffenheit, die Abmessungen der Klebeflächen und die Temperatur für die resultierenden Verbindungseigenschaften bei der Wahl des richtigen Klebstoffs von Bedeutung.

### 8.2.3.2 Beispiel: Drehmomentübertragung

In Exzentrerschneckenpumpen unterliegen die metallischen Rotoren bei besonders aggressiven Fördermedien einem hohen mechanischen Verschleiß. Rotoren aus SiC-Keramik besitzen durch die deutlich höhere Härte im Vergleich zu Metallrotoren eine bis zu 20-fach höhere Standzeit.

Die Krafteinleitung in den Rotor erfolgt über ein Bolzengelenk. Da die Keramik empfindlich auf Schlagbeanspruchung und Zugspannung reagiert, ist eine vollständige Fertigung des Rotors aus Keramik nicht sinnvoll. Der Einsatz von Keramikrotoren erfordert daher eine geeignete Verbindungstechnik, um den Vorteil der Keramik nutzen zu können.

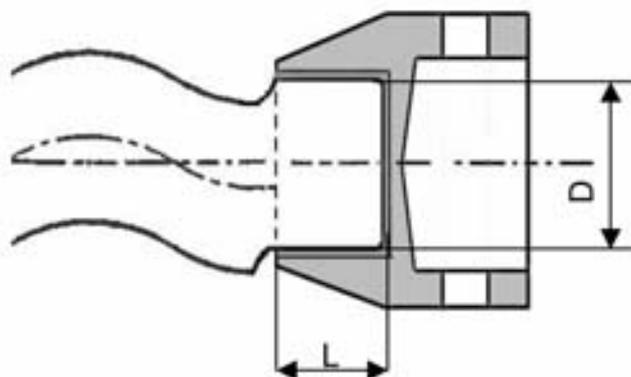
Als mögliche Fügetechnik bietet sich in diesem Fall das Kleben an. Bei der Auslegung der Verbindung ist bei einer Exzentrerschnecke auf Folgendes zu achten:

- Werkstoff des (metallischen) Kopfs,
- Art und Größe der auftretenden Kräfte,
- max. Einsatztemperaturen und
- Umgebungsmedium.



**Bild 205:** Exzentrerschnecke aus Siliciumcarbid

Das Siliciumcarbid der Exzentrerschnecke und der Edelstahl oder der gehärtete Werkzeugstahl des Kopfs bestimmen die Art der Oberflächenvorbereitung (z. B. Entfetten und Sandstrahlen) und ggf. die Oberflächenbehandlung. Einige Materialien haben passive Oberflächen, die mit Haftvermittlern behandelt werden müssen, um eine ausreichende Adhäsion zwischen Klebstoff und Fügepart zu gewährleisten.



**Bild 206:** Klebestelle der Exzentrerschnecke

Art und Größe der auftretenden Belastungen während des Betriebes bestimmen die Auslegung der Klebeflächen und die Wahl des Klebstoffs. Bei Exzentrerschnecken treten hauptsächlich Torsionsbelastungen auf, sodass eine stirnflächige Verklebung nicht sinnvoll ist. Die Krafteinleitung erfolgt daher über den Umfang eines zentrischen Kopfs.

Die maximalen Kräfte bestimmen die Größe der Klebeflächen. Das übertragbare theoretische Torsionsdrehmoment (Nm) berechnet sich nach folgender Formel:

$$M_t = \tau_t \frac{\pi D^2 L}{2}$$

Wobei  $\tau_t$  die Klebefestigkeit des Klebstoffes, D den Fügedurchmesser und L die Klebelänge darstellen.

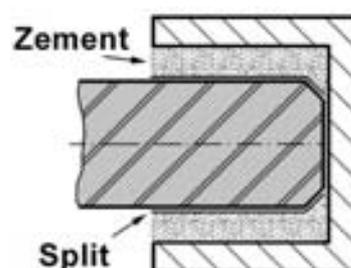
Die Belastung der Verbindung sollte jedoch nur 10 % - 30 % (abhängig vom verwendeten Klebstoff) der theoretischen Festigkeit nutzen.

Sehr wichtig für die Wahl des Klebstoffes ist die Einsatztemperatur. Die maximalen Einsatztemperaturen von Klebstoffen auf organischer Basis liegen bei bis zu 400 °C. Bei zu großen Temperaturen erweicht bzw. zersetzt sich die Klebeschicht, und es kommt schnell zum Versagen der Verbindung.

Für die Langzeitbeständigkeit der Klebung ist der mediale Einfluss von Bedeutung. So setzt z. B. eindiffundierende Feuchtigkeit bei einigen Klebstoffen die Festigkeit stark herab.

### 8.2.3.3 Weitere Anwendungen

- **Hochspannungsisolator**  
Befestigung der zug- oder druckbelasteten Armatur eines Isolators.



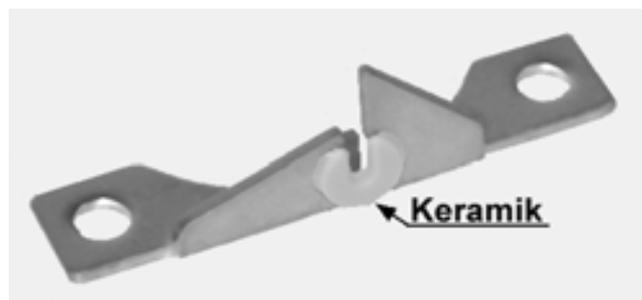
**Bild 207:** Verbindung durch Zementieren

- **Kupplungs-Ringscheibe**  
Aussteifung eines Kunststoffes
  - Epoxidharz, keramisch gefüllt
  - Aushärtebedingungen: 180 °C, 30 min
  - Arbeitstemperatur 220 °C



**Bild 208:** Kupplungsringsscheibe

- **Schlitzfadenführer**  
Gezielte Panzerung der Verschleißstelle eines Bauteils
  - 2-Komponentenkleber
  - Aushärtebedingungen: 80 °C, 1h
  - Arbeitstemperatur 100 °C



**Bild 209:** Schlitzfadenführer

### 8.2.4 Löten

Mit dem Löten lassen sich stoffschlüssige Verbindungen zwischen Keramik und Metall sowie zwischen Keramik und Keramik herstellen.

Üblicherweise wird die Keramik dazu vorher metallisiert.<sup>23</sup> Die Art der Metallisierung orientiert sich daran, ob Hart- oder Weichlöten vorgesehen ist und muss auf die Keramik abgestimmt sein. Bevorzugte keramische Werkstoffe für das Hart- und Weichlöten sind Aluminiumoxid und Aluminiumnitrid.

Darüber hinaus gibt es das Aktivlöten, das auf die Metallisierung der Keramik verzichtet und spezielle Aktivlote erfordert. Weitere Lötverfahren sind in der Literatur<sup>24</sup> zu finden.

#### 8.2.4.1 Weichlöten

Weichlote schmelzen nach DIN 8505 unter 450 °C, typische Weichlote zwischen 150 und 250 °C. Sie werden zwischen 190 und 250 °C verarbeitet. Typische Lote sind die eutektischen Systeme von Zinn/Blei (Schmelzpunkt 183 °C) und Zinn/Silber (Schmelzpunkt 221 °C).

Die Metallisierungen basieren in der Regel auf Edelmetallbasis (Silber, Silber/Palladium, Silber/Platin, Gold, Palladium/Gold, Platin/Gold).

Bevorzugte Anwendungsfelder für das Weichlöten sind Elektrotechnik und Elektronik, und dort insbesondere die Hybridschaltungen. Passive und aktive Bauelemente überstehen in der Regel die Temperaturbelastung beim Löten mit Weichloten.

Die auftretende Löttemperatur bedeutet auch einen Temperaturschock für die metallisierte Keramik, der in der Regel aber selbst für empfindliche Keramikwerkstoffe unkritisch ist.

---

<sup>23</sup> Siehe S. 91.

<sup>24</sup> Siehe Tietz, Kap. 5.2.3, S. 212ff.

### 8.2.4.2 Hartlöten

Hartlote schmelzen nach DIN 8505 oberhalb von 450 °C, typische Hartlote zwischen 600 und 800 °C und Verarbeitungstemperaturen zwischen typisch 600 bis 900 °C. Typische Vertreter sind Silberhartlote auf der Basis von Silber, Kupfer und Zink. Flussmittelfreies Vakuumlöten und Schutzgaslöten im Lötöfen finden als Hochtemperaturlöten bei > 900 °C statt.

Die Metallisierungen benötigen hochschmelzende Metalle (refraktäre Metallisierung) wie z. B. Molybdän oder Wolfram. Hartlötbare metallisierte Keramik kann komplett von den Keramikherstellern geliefert werden.

Die Anwendungsschwerpunkte liegen im Maschinenbau.

Die auftretenden Löttemperaturen sind in der Regel unkritisch für die Keramik. Es muss jedoch beachtet werden, dass die miteinander verlöteten Partner sich in den Temperaturendeckungskoeffizienten unterscheiden. Bei der Abkühlung entstehen im Lot und in den beteiligten Lötpartnern mechanische Spannungen, die durch angepasste Temperaturkoeffizienten und konstruktive Maßnahmen auf zulässige Beanspruchung reduziert werden müssen.

### 8.2.4.3 Aktivlöten

Aktivlote schmelzen typisch zwischen 600 und 1.000 °C und werden zwischen 800 und 1.050 °C verarbeitet.

Durch die Verwendung von Aktivloten ist ein direktes Löten von Keramik ohne zusätzliche Metallisierung möglich. Bei diesen Loten handelt es sich um metallische Lote, die aufgrund ihrer Legierungszusammensetzung in der Lage sind, nichtmetallische, anorganische Werkstoffe zu benetzen. Sie enthalten Komponenten, wie z. B. Titan, Zirkonium oder Hafnium, die mit Keramik reagieren.

Besondere Aufmerksamkeit erfordern Aktivlote beim Löten, weil sie nicht wie konventionelle Lote fließen und der Kapillareffekt nicht nutzbar ist. Des Weiteren ist das Aktivlöten in Öfen mit sorgfältig überwachter Ofenatmosphäre durchzuführen.

Der Prozess des Aktivlötens wird durch die hohe Reaktionsfreudigkeit des Titan bewirkt. Während des Lötprozesses bildet sich in der Ober-

fläche der Keramik eine dünne, durchgehende Reaktionsschicht aus, die die notwendige Haftung gibt.

Aktivlotssysteme bestehen typischerweise aus Silber/Titan, Silber/Kupfer/Titan und Silber/Kupfer/Indium/Titan. Das Lötten erfolgt in der Regel unter Argon oder im Vakuum.

Neben Aluminiumoxid und Aluminiumnitrid können nahezu alle Keramiken sowie schwer benetzbare Metalle gelötet werden. Aktiv gelötete Verbunde gehören daher in den Bereich des Maschinenbaus.

Lote für verschiedene Keramiken sind im Handel erhältlich.<sup>25</sup>

### 8.2.4.4 Maßnahmen

Das Lötten fügt stoffschlüssig unterschiedliche Materialien zusammen. Die materialabhängigen Temperatúrausdehnungskoeffizienten unterscheiden sich teilweise erheblich. Beim Abkühlen schrumpfen freie Materialien unterschiedlich, nach dem Lötten bauen sich im Verbund der verschiedenen Materialien jedoch entsprechende Spannungen auf.

Für die Beherrschung solcher thermisch induzierter Spannungen gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Die Konstruktion führt zu akzeptablen Druckspannungen in der Keramik.
- Die Fügepartner werden aus Materialien gefertigt, die sich im Temperaturkoeffizienten nur gering unterscheiden.
- Es wird zusätzliches Puffermaterial verwendet, das durch elastische oder plastische Verformung ausgleicht. Solche Puffer können die Lote selbst bilden. Weichlote sind hierfür wegen ihrer physikalischen Eigenschaften und ihrer verwendeten Dicke besonders geeignet.

---

<sup>25</sup> Z. B. Degussa-Hüls CB1 bis CB6.

## 9 Qualität

*Qualität setzt intensive Kunden-Lieferantenbeziehungen voraus.*

### 9.1 Qualität planen

Qualität muss geplant werden.

Geplante Qualität beginnt beim Kunden durch den Kontakt von Vertrieb und Anwendungstechnik.

*Anfrage- und Angebotsphase:*

- Qualitätsmerkmale spezifizieren,
- Fertigungsprozess festlegen,
- Zeichnung der keramikgerechten Konstruktion erstellen,
- Toleranzen abstimmen,
- Herstellungskosten kalkulieren,
- Produkt- und Prozessprüfung festlegen und
- Termine abschätzen.

*Auftrag:*

- Arbeitspläne,
- Terminplanung,
- Materialplan und
- Prüfpläne erstellen.
- Werkzeugbau informieren und für
- Detailplanung und Betriebsmittel sorgen, wie auch
- vorbeugende Instandhaltung usw.

### 9.2 Qualität produzieren

Qualität muss produziert werden durch

- Optimierung der Abläufe zur Schaffung vorhersagbarer, beherrschter Prozesse durch Qualitätstechniken, wie:<sup>26</sup>
  - QFD            Quality Function Development
  - DOE            Design of Experiments
  - FMEA          Failure Mode and Effects Analysis
  - SPC            Statistical Process Control,  $C_{pk}$ -Werte usw.
  - Poka Yoke    Schaffung irrtumstoleranter Verfahren,
- Identifikation der Mitarbeiter mit dem Produkt (jeder ist für Qualität verantwortlich),
- Zielorientierung auf Produktion mit Null-Fehlerrate (+ 6 s,  $C_{pk} > 2$ ) und
- unabhängige Qualitätsnachweise, die belegen, dass Produkte und Leistungen den Vereinbarungen mit dem Kunden entsprechen.

### 9.3 Qualität managen

Qualität muss gemanagt werden durch ein

- geeignetes Qualitätsmanagementsystem (z. B. DIN ISO 9000ff / EN 29000)
- als ganzheitliche Unternehmensphilosophie. (TQM = total quality management)

### 9.4 Prüfungen (Q-Nachweis)

Die vielfältigen Einflussgrößen der keramischen Technologie erfordern ständige Prüfung in allen Bereichen der Fertigung.

Ein gleich bleibender Qualitätsstandard wird durch ein umfassendes Qualitätsmanagementsystem gewährleistet. Die fertigungsbegleitenden Qualitätslenkungsmaßnahmen sind in Prüfplänen niedergelegt, die Bestandteil der Fertigungspläne sind.

Warenbegleitpapiere, Qualitätsregelkarten und Prüfprotokolle ermög-

---

<sup>26</sup> Siehe S. 207.

lichen so die Überprüfung aller dokumentierten Prozessschritte und gewährleisten die Rückverfolgbarkeit bis zum Rohstoff.

Die Schwerpunkte der Prüfung liegen bei<sup>27</sup>

- der Eingangsüberwachung der Rohstoffe und Halbzeuge,
- der Überwachung der Werkstoffkennwerte gemäß Prüfspezifikation,
- der Prozessüberwachung, um einen gleichmäßigen, vorher-sagbaren und kontrollierten Prozess fahren zu können und<sup>28</sup>
- der Endprüfung.

Das Prüfspektrum reicht von der 100 %-Prüfung bestimmter Parameter, integriert in die automatische Fertigung, bis zu aufwändigen Dauertests an Stichproben. Eine besondere Bedeutung hat die statistische Prüfung bei der Endkontrolle des Herstellers bzw. bei der Eingangskontrolle des Kunden. Obwohl grundsätzlich eine Ware ohne Fehler die Basis jeder Liefervereinbarung ist, ist ein Nachweis der Qualitätslage aus kaufmännisch juristischen Gründen unverzichtbar. Die Beurteilung der **Akzeptanz-Qualitäts-Lage (AQL)**<sup>29</sup> macht daher eine statistische Aussage aufgrund von Stichproben zwingend notwendig.

## 9.5 Qualitätstechniken

*QFD* (Quality Function Deployment)

- Qualitätserwartungen fokussieren und durchplanen (nach dem Schema des „House of Quality“),
- Planungsschema zur Umsetzung der Markterwartungen/Kundenerwartungen für eine möglichst fehlerfreie Produktion mit den vier Phasen
  - Produktstrategie,
  - Produktspezifikation,
  - Prozessspezifikation und

---

<sup>27</sup> Siehe Kap. 4, S. 67, Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren.

<sup>28</sup> Siehe S. 239ff.

<sup>29</sup> AQL-Tabellen mit Stichprobenplänen für normale, reduzierte und verschärfte Prüfung können vom Verband der Keramischen Industrie e.V. angefordert werden.

- Prozesssicherung.

### *DOE* (Design of Experiments)

- Statistische Versuchsplanung dient zur systematischen und rationellen Informationsgewinnung für ständige Qualitätsverbesserungen. Hierfür werden Methoden wie
  - Taguchi,
  - Shainin und
  - Faktorenversuchspläne angewendet.

### *FMEA* (Failure Mode and Effects Analysis)

- Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse oder besser: Fehlermöglichkeiten erkennen und ausschalten.
- Die bekanntesten/häufigsten Anwendungen sind
  - Entwicklungs-FMEA und
  - Prozess-FMEA.

### *SPC* (Statistical Process Control)<sup>30</sup>

- Statistische Prozessführung mit Qualitätsregelkarten und
- systematischer Prozessverbesserung durch Prozesseingriffe bei Prozesseingriffsgrenzenverletzung. Hierzu gehören auch Fähigkeitsuntersuchungen an
  - Messmitteln und
  - Anlagen.

### *Poka Yoke*

- Fehlervermeidung in Prozessen durch Schaffung von Zwangsabläufen, d. h. eine Denkweise erzeugen und verhindern, dass aufgrund menschlichen Irrtums Fehler im Prozess oder am Produkt entstehen.

---

<sup>30</sup> Siehe S. 246ff.

## 10 Anhang

### 10.1 Bindungsarten und Festigkeit

Die **metallische Bindung** wird mit der Existenz frei beweglicher Elektronen zwischen Atomrümpfen erklärt. Aus diesem Modell leiten sich ihre Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit und *Duktilität* ab. Wegen der allseitig ungerichteten Wirkung der metallischen Bindung bilden sich in typischen Metallstrukturen dichte Atompackungen mit hohen Koordinationszahlen. Die Duktilität metallischer Werkstoffe kann modellmäßig durch das Abgleiten dichtest gepackter Ebenen ohne Änderung des Bindungszustandes gedeutet werden. Die metallische Bindung ist in der Regel schwächer als die ionische und die kovalente.

Bei **keramischen Werkstoffen** liegen in der Regel eine Mischform von **ionischer und kovalenter Bindung** vor. Während die Ionenbindung immer durch einen Elektronenübergang zwischen einem Metall- und einem Nichtmetallatom gekennzeichnet ist, teilen sich bei der rein kovalenten Bindung Nichtmetallatome gemeinsame Elektronenpaare. Die starken Bindungskräfte keramischer Materialien kommen in den *hohen E-Moduli- und Härtewerten*, den hohen *Schmelzpunkten*, der geringen Wärmedehnung und der *guten chemischen Resistenz* dieser Werkstoffe zum Ausdruck. Die kovalente Bindung ist stark gerichtet; Zuordnung und Abstand benachbarter Atome liegen genau fest. Die Stabilität ionischer und kovalent gebundener Feststoffe hängt stark von der Aufrechterhaltung der atomaren Geometrie ab und erklärt die *fehlende plastische Verformbarkeit* bei Belastung (niedrige Bruchzähigkeit). Keramische Werkstoffe sind hart und deshalb *spröde*. Ihrem Spröbruchverhalten muss der Konstrukteur bei der Auslegung der Bauteilbeanspruchung unbedingt Rechnung tragen.

**Organische Polymere** sind aus langen Molekülketten aufgebaut, die sich bei Raumtemperatur entweder ungeordnet verknäult oder in regelmäßiger Anordnung zusammengelagert haben. Zwischen den Makromolekülen chemisch nicht vernetzter Kunststoffe wirken ausschließlich Nebenvalenzkräfte, so genannte **van der Waal'sche Kräfte**. Diese sind um ein bis zwei Zehnerpotenzen kleiner als die kovalenten Kräfte und können durch Wärmebewegung leicht überwunden werden. Dies begründet die *geringe Warmfestigkeit*, den *niedrigen E-Modul*, den

## Anhang

hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, aber auch die hervorragenden elastischen und plastischen Dehnungswerte dieser Werkstoffe. Wie Keramiken haben die Polymere eine gute chemische Beständigkeit, elektrische und thermische Isolationseigenschaften. Bei tiefen Temperaturen zeigen sie eine ausgeprägte Sprödigkeit.

### 10.2 Werkstoffvergleich

Werkstoff	elektrisch		thermisch		
	Permittivitätszahl $\epsilon_r$ -	Spez. elektr. Widerstand $\rho_V$ $\Omega \text{ cm}$	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Ausdehnungskoeffizient $\alpha_{RT-1000^\circ\text{C}}$ $10^{-6}\text{K}^{-1}$	max. Einsatztemperatur $T_{\text{max}}$ $^\circ\text{C}$
Stahl	Angabe nicht üblich	$> 10^{-5}$	$> 30$	$> 10$	400
Warmfeste Stähle	Angabe nicht üblich	$> 10^{-5}$	$> 0$	$> 6$	800
Gusseisen	Angabe nicht üblich	$(0,5 - 1,7)10^{-4}$	15 - 60	5 - 18	400
Aluminiumlegierung	Angabe nicht üblich	$(0,03 - 1,1)10^{-4}$	70 - 130	20 - 26	250
Holz	3,5 - 5	$10^{11} - 10^{14}$	0,1 - 0,2	4	180
Kunststoff	2,2 - 4,6	$10^{15} - 10^{18}$	0,14 - 0,25	20 - 180	200
Technische Keramik	5 - 10	$10^2 - 10^{14}$	1 - 200	0 - 11	1.000 - 2.000
Glas	3 - 19	$> 10^{13}$	1 - 3	3 - 10	200 - 1.200

**Tabelle 27:** Werkstoffvergleich für elektrische und thermische Kenngrößen

Werkstoff	mechanisch										Härte
	Dichte	Biegefestigkeit	Zugfestigkeit	kritischer Spannungsfaktor	Kerbschlagzahl	Bruchdehnung	E-Modul				
	$\rho$ g cm <sup>-3</sup>	$\sigma_b$ MPa	$\sigma_z$ MPa	$K_{IC}$ MPa $\sqrt{m}$	Jm <sup>-2</sup>	$\epsilon$ %	E GPa				
Stahl	7,8	$-\sigma_z$	360 - 700	140	$10^5 - 10^6$	10 - 20	200			200 - 400	
Warmfeste Stähle	7,8	$-\sigma_z$	500 - 1.000	50 - 154	-	-	200			< 900	
Gusseisen	7,3	300 - 600	150 - 400	15 - 25	$10^4$	< 2	70 - 130			150 - 250	
Aluminiumlegierung	2,8	150 - 300	350	45	$10^5$	5 - 20	70			30 - 140	
Holz	0,2 - 1,2	50 - 150	70 - 130	0,5 - 1	$10^4$	- 1	10			35 - 150	
Kunststoff	0,9 - 2,2	10 - 150	10 - 705	0,3 - 4	$10^6 - 10^8$	2 - 1200	1 - 4			-	
Technische Keramik	2,25 - 5,98	30 - 1.400	(*)	1 - 10,5	(*)	< 0,1	40 - 450			1.200 - 3.200	
Glas	2,2 - 2,5	70	70 - 100	< 1	$10^1$	-	2,5			200 - 800	

(\*) Angabe nicht üblich

**Tabelle 28:** Werkstoffvergleich für mechanische Kenngrößen

### 10.3 Allgemeintoleranzen für Maße und Formen

Technische Keramik nutzt unterschiedliche Normen. **DIN 40 680** gibt Maß- und Formtoleranzen für Bauteile vor, die „**as fired**“, also **ohne weitere Bearbeitung** nach dem Brand benutzt werden. Die Genauigkeitsgrade sind herstellungs- und werkstoffabhängig.

DIN ISO 2768 und DIN ISO 1101 geben Toleranzen für solche Bauteile vor, die zum Erreichen der erforderlichen Genauigkeiten im Maschinenbau im schon gebrannten Zustand zusätzlich **hartbearbeitet**, z. B. geschliffen werden müssen.

#### 10.3.1 Toleranzen und Funktion

Toleranzen nach Norm DIN 40 680 beruhen auf den anwendungsbedingten Erfordernissen und den Anforderungen durch unterschiedliche keramische Herstellverfahren und Werkstoffe ohne Hartbearbeitung.

Um verbesserte Maß- und/oder Form- bzw. Lagetoleranzen zu erreichen ist eine spanende Bearbeitung (z. B. Schleifen, Läppen-Polieren o. a.) der „as fired“-Bauteile nach dem Brand notwendig. Die dadurch erzielbaren Toleranzen sind in der DIN ISO 2768 (Allgemeintoleranzen für spanend gefertigte Werkstücke) und DIN ISO 1101 (Form- und Lagetoleranzen) festgelegt.

Diese Normen werden im Maschinenbau und in angrenzenden Industriezweigen üblicherweise angewendet.

**Bei keramischen Bauteilen ist aus wirtschaftlichen Gründen immer darauf zu achten, dass nur notwendige Flächen, z. B. Funktionsflächen, mit eingegengten Toleranzen versehen werden und für alle anderen Flächen die Allgemeintoleranzen nach DIN 40 680 gelten.**

Die in DIN ISO 2768 beschriebenen Maßtoleranzen werden in Abhängigkeit von der Bauteildimension in die Kategorien „**fein**“, „**mittel**“ und „**grob**“ eingeteilt. Zusätzlich wird eine Toleranzklasse für ausgewählte Form- und Lagetoleranzen angegeben („**H**“ für „**fein**“, „**K**“ für

„mittel“ und „L“ für „grob“). Darüber hinaus reichende oder abweichende Anforderungen zu Form- und Lagetoleranzen richten sich nach DIN ISO 1101.

Eine entsprechende Angabe für Maß- sowie für Form- und Lagetoleranzen lautet z. B.

### **DIN ISO 2768-m-K oder z. B. DIN ISO 2768-g-L**

Für weitere Details siehe DIN ISO 2768 und DIN ISO 1101.

Die Hersteller von Bauteilen aus Technischer Keramik haben sich auf einzelne Werkstoffe und Herstellungsverfahren spezialisiert, um wirtschaftlich fertigen zu können, da die verschiedenen Werkstoffgruppen streng getrennte Fertigungslinien und z. T. besondere Einrichtungen benötigen. Hersteller, die überwiegend Bauteile für den Maschinenbau fertigen, werden laufend mit engen Toleranzen konfrontiert und sind deshalb in der Regel mit Maschinen zur Hartbearbeitung ausgerüstet.

## **10.3.2 Allgemeintoleranzen für Maße**

### **10.3.2.1 Keramik „as fired“**

Die Allgemeintoleranzen für Maße DIN 40 680-1 gelten für Werkstücke aus keramischen Werkstoffen nach DIN EN 60 672-1. Sie werden sinngemäß auch bei feinkeramischen Erzeugnissen für allgemeine technische Zwecke angewendet.

Die Maßabweichungen sind durch die Eigenart der keramischen Technologie bedingt (siehe S. 81). Einengungen der Maßtoleranzen sind nur durch erhöhten technischen Aufwand möglich und ggf. zwischen Hersteller und Anwender im Hinblick auf den Anwendungsfall zu vereinbaren.

Neben den Maßtoleranzen sind je nach Verwendungszweck auch Formtoleranzen zu beachten (siehe S. 218).

Werden keramische Werkstücke glasiert oder mit elektrisch leitfähigem Belag versehen, so gelten die Maße und Toleranzen für das fertige Werkstück. Die Wahl der Toleranzen hängt von

- der erforderlichen Genauigkeit und

- der keramisch-fabrikatorisch bedingten Ausführbarkeit ab, die ihrerseits vom Werkstoff abhängig ist.

Die Genauigkeitsgrade werden eingeteilt in

- **grob (g)** für Toleranzen, die in der keramischen Fertigungstechnik z. B. bei den Herstellungsverfahren Strangpressen und Gießen eingehalten werden können,
- **mittel (m)** für Toleranzen, die bei kleinen Teilen, insbesondere der Niederspannungs-Installationstechnik, z. B. mit Strangpressen, undosiert Pressen, dosiert Halbfeuchtpressen, dosiert Trockenpressen und Weißbearbeiten eingehalten werden können und
- **fein (f)** für Werkstücke, bei denen die Genauigkeitsgrade „grob“ und „mittel“ nicht ausreichen. „Fein“ kann durch keramische Fertigungsmethoden nicht sichergestellt werden und macht besondere zusätzliche Maßnahmen nach dem Brennen, z. B. Schleifen, Bohren, usw., erforderlich. Ist der Genauigkeitsgrad „fein“ erforderlich, dann muss die Herstellungsgenauigkeit nach ISO-Toleranzen zwischen Hersteller und Anwender vereinbart werden.

Die Bezeichnung einer Allgemeintoleranz für Maße (A) mit dem Genauigkeitsgrad „mittel“ (m) lautet:

Allgemeintoleranz DIN 40 680-A-m

Es sollte davon abgesehen werden, alle Maße mit hohen Anforderungen zu versehen, da dies die Kosten erheblich steigert.

### 10.3.2.2 Keramik hartbearbeitet

Bei Bauteilen aus Technischer Keramik für Maschinenbauanwendungen genügen die vorher genannten Toleranzen für Funktionsflächen<sup>31</sup> oft nicht den Anforderungen der Anwender. Aus diesem Grund werden für keramische Teile Toleranzen gemäß

#### **DIN ISO 2768-m-K**

angeben, die mittels Hartbearbeitung erreichbar sind.

---

<sup>31</sup> Siehe S. 218.

## Zeichnungsangaben

Maßtoleranzen, die nicht den Allgemeintoleranzen nach dieser Norm entsprechen, sind nach DIN 40 680-1 und -2 durch Abmaße oder ISO-Toleranzfelder direkt dem jeweiligen Nennmaß anzufügen.

Allgemeintoleranzen der Genauigkeitsgrade „mittel“ und „grob“ mit symmetrischen Abmaßen nach Tabelle 29/30 werden nicht dem Nennmaß direkt angefügt. Stattdessen wird im dafür vorgesehenen Zeichnungsschriftfeld folgende Eintragung vorgenommen:

**DIN 40 680-A-m** bzw.

**DIN 40 680-A-g**

Werden in einer Zeichnung mehrere keramische Teile dargestellt, die nach verschiedenen Verfahren hergestellt werden und für die deshalb Allgemeintoleranzen verschiedener Genauigkeitsgrade der Norm DIN 40 680-1 festgelegt werden, dann wird nur der gröbere Genauigkeitsgrad in das Zeichnungsschriftfeld eingetragen. Die Abmaße des feineren Genauigkeitsgrades werden dann dem jeweiligen Nennmaß angefügt.

Es kann vorkommen, dass aus funktionellen oder fertigungstechnischen Gründen nur positive oder nur negative Abmaße zugelassen werden können, der Toleranzbereich jedoch den Abmaßen eines bestimmten Genauigkeitsgrades der Allgemeintoleranzen nach Tabelle 29/30 entsprechen soll. In diesen Fällen wird im jeweiligen Nennmaßbereich der Zahlenwert der zugeordneten Allgemeintoleranz verdoppelt und nur mit einem Vorzeichen versehen. Diese Toleranzen gelten jedoch nicht als Allgemeintoleranz und werden deshalb dem jeweiligen Nennmaß angefügt und nicht ins Schriftfeld eingetragen.

Da für den Genauigkeitsgrad „fein“ keine Allgemeintoleranzen festgelegt sind, werden die zwischen Hersteller und Anwender zu vereinbarenden Abmaße oder ISO-Toleranzen grundsätzlich hinter das Nennmaß gesetzt.

Für weitere Details siehe DIN 40 680-1.

## Anhang

Herstellungsverfahren	Genauigkeitsgrad						
	Fertigteil aus keramischem Isolierstoff nach DIN EN 60 672-1						
	C 100	C 200	C 300	C 400	C 500	C 600	C 700
gegossen	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>
gedreht	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	
stranggepresst für Teile mit einem Hüllmaß von 30 mm und mehr	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>	<b>grob (g)</b>
stranggepresst für Teile mit einem Hüllmaß bis 30 mm	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>
undosiert gepresst	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>		<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	
dosiert halbfeucht gepresst	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>		<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>		
dosiert trocken ge- presst		<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>		<b>fein (f)</b>
weißbearbeitet	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>	<b>fein (f)</b>

**Tabelle 29:** Herstellungsverfahren für Maßtoleranzen nach DIN 40 680-1 der Genauigkeitsgrade „grob“ und „fein“

Nennmaßbereich für Durchmesser oder Längen in mm <i>d</i>	Toleranz nach DIN 57 446-1/ DIN 0466-1	Genauigkeitsgrad grob (g) nach DIN 40 680-1	Genauigkeitsgrad mittel (m) nach DIN 40 680-1
bis 4	± 1,6	± 0,4	± 0,15
über 4 bis 6	± 1,7	± 0,6	± 0,20
über 6 bis 8	± 1,8	± 0,7	± 0,25
über 8 bis 10	± 1,9	± 0,8	± 0,30
über 10 bis 13	± 2,0	± 0,9	± 0,35
über 13 bis 16	± 2,1	± 1,0	± 0,40
über 16 bis 20	± 2,3	± 1,2	± 0,45
über 20 bis 25	± 2,5	± 1,2	± 0,50
über 25 bis 30	± 2,7	± 1,5	± 0,55
über 30 bis 35	± 2,9	± 2,0	± 0,60
über 35 bis 40	± 3,1	± 2,0	± 0,65
über 40 bis 45	± 3,3	± 2,0	± 0,70
über 45 bis 50	± 3,5	± 2,5	± 0,80
über 50 bis 55	± 3,7	± 2,5	± 0,90
über 55 bis 60	± 3,9	± 2,5	± 1,00
über 60 bis 70	± 4,3	± 3,0	± 1,20
über 70 bis 80	± 4,7	± 3,5	± 1,40
über 80 bis 90	± 5,1	± 4,0	± 1,60
über 90 bis 100	± 5,5	± 4,5	± 1,80
über 100 bis 110	± 5,9	± 5,0	± 2,00
über 110 bis 125	± 6,5	± 5,5	± 2,20
über 125 bis 140	± 7,1	± 6,0	± 2,50
über 140 bis 155	± 7,7	± 6,5	± 2,80
über 155 bis 170	± 8,3	± 7,0	± 3,00
über 170 bis 185	± 8,9	± 7,5	± 3,40
über 185 bis 200	± 9,5	± 8,0	± 3,80
über 200 bis 250	± 11,0	± 9,0	± 4,20
über 250 bis 300	± 13,5	± 10,0	± 4,60
über 300 bis 350	± 14,8	± 11,0	± 5,00
über 350 bis 400	± 16,0	± 12,0	± 5,50
über 400 bis 450	± 17,3	± 13,0	± 6,10
über 450 bis 500	± 18,5	± 14,0	± 6,80
über 500 bis 600	± 21,0	± 15,0	± 7,60
über 600 bis 700	± 23,5	± 16,0	± 8,30
über 700 bis 800	± 26,0	± 17,5	± 9,00
über 800 bis 900	± 28,5	± 19,0	± 9,50
über 900 bis 1000	± 31,0	± 20,0	± 10,00
über 1000	± (0,025*d+6)	± 0,02*d	± 0,01*d

**Tabelle 30:** Allgemeintoleranzen für Werkstücke ohne Bearbeitung nach dem Brand

### 10.3.3 Allgemeintoleranzen für Form

#### 10.3.3.1 Keramik „as fired“

Die Allgemeintoleranzen für Form nach **DIN 40 680-2** gelten für Werkstücke aus keramischen Werkstoffen nach DIN EN 60 672-1. Sie wird sinngemäß auch bei feinkeramischen Erzeugnissen für allgemeine technische Zwecke angewendet.

Die Formabweichungen sind durch die Eigenart der keramischen Technologie bedingt (siehe S. 81). Einengungen der Formtoleranzen sind nur durch erhöhten technischen Aufwand möglich und ggf. zwischen Hersteller und Anwender im Hinblick auf den Anwendungsfall zu vereinbaren.

Neben den Formtoleranzen sind je nach Verwendungszweck auch Maßtoleranzen zu beachten (siehe S. 218).

Eine **Formtoleranz** bezieht sich nur auf jeweils ein Formelement eines keramischen Werkstücks. Sie gibt den Bereich an, innerhalb dessen die Istform eines Formelements von der geometrischen Form abweichen darf. Man unterscheidet unter anderem als Formtoleranzen

- Geradheitstoleranz (früher: Durchbiegung),
- Ebenheitstoleranz und
- Zylinderformtoleranz.

Außerdem sind Lagetoleranzen, wie

- Parallelität,
- Rechtwinkligkeit,
- Rundlauf und
- Planlauf

zu beachten und ggf. festzulegen.

Die Formtoleranz für ein geometrisches Formelement eines keramischen Werkstücks ist durch die **Toleranzzone** begrenzt.

Werden keramische Werkstücke glasiert oder mit elektrisch leitfähigem Belag versehen, so gelten die zusätzlichen Genauigkeiten für das fertige Erzeugnis.

## Geradheit (B)

Definition:

Die **Geradheitstoleranz** einer Linie ist der Abstand zweier paralleler Ebenen, zwischen denen alle Punkte der Linie liegen müssen, wenn die Toleranz nur in einer Richtung angegeben ist.

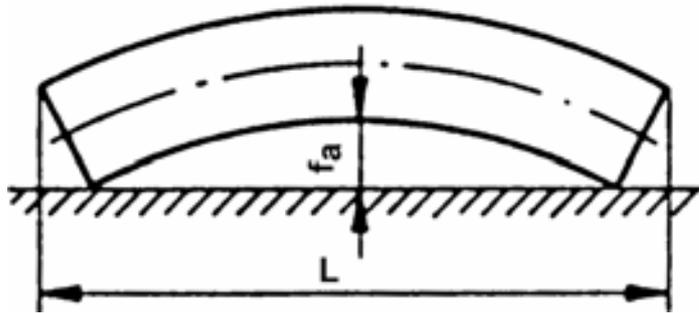
Die Geradheitstoleranz ist in Tabelle 31 für Werkstücklängen bis 1.000 mm in Millimeter angegeben. Bei Werkstücken über 1.000 mm Länge ist sie nach den angegebenen Formeln zu berechnen. Es werden je nach dem Herstellungsverfahren drei Genauigkeitsgrade unterschieden.

- **Grob (g)** gilt für keramische Erzeugnisse, die nach dem Gieß-, Dreh- oder Strangpressverfahren hergestellt sind und z. B. in der Hochspannungs- und in der chemischen Apparatechnik verwendet werden.
- **Mittel (m)** gilt hauptsächlich bei keramischen Erzeugnissen mittlerer Größe, die stranggepresst, undosiert gepresst, dosiert halbfeucht gepresst, dosiert trocken gepresst oder weißbearbeitet hergestellt werden.
- **Fein (f)** gilt bei keramischen Erzeugnissen, bei denen die Genauigkeitsgrade „grob“ und „mittel“ nicht ausreichen. Genauigkeitsgrad „fein“ kann nur durch zusätzliche Maßnahmen, wie z. B. Schleifen, sichergestellt werden. Ist der Genauigkeitsgrad „fein“ erforderlich, dann sind die Toleranzwerte zwischen Hersteller und Anwender zu vereinbaren.

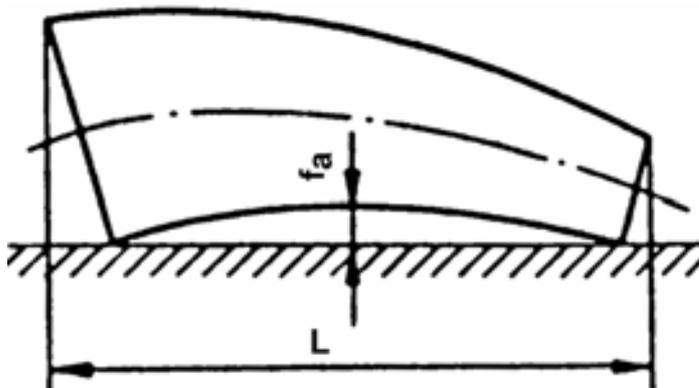
Die Bezeichnung einer Allgemeintoleranz für die Geradheit (B) mit der Genauigkeit „mittel“ lautet:

Allgemeintoleranz DIN 40 680-B-m.

### Messung der Geradheit:



**Bild 210:** Abweichung von der Geradheit (Durchbiegung) eines zylindrischen Formstücks nach DIN 40 680-2 (vgl. Tabelle 31)



**Bild 211:** Abweichung von der Geradheit (Durchbiegung) eines nicht zylindrischen Formstücks (Kegel) nach DIN 40 680-2 (vgl. Tabelle 31)

### Ebenheit (C)

Definition:

Die **Ebenheitstoleranz** ist der Abstand zweier paralleler Ebenen, zwischen denen alle Punkte der tolerierten Fläche liegen müssen.

Die festzulegende Ebenheitstoleranz hängt von der Art des keramischen Werkstoffs (Typ), der Gestalt des Werkstücks und dem Fertigungsverfahren ab. Analog zur Geradheit werden, je nach dem Herstellungsverfahren, die drei Genauigkeitsgrade „grob“, „mittel“ und „fein“ unterschieden, die etwa prozentanteilig vom größten Längenmaß, das innerhalb der Fläche vorhanden ist, abhängen und in Tabelle 31 aufgeführt sind.

- **grob (g)**  
Toleranz  $0,8 \% \cdot \text{Länge}$
- **mittel (m)**  
Toleranz  $0,5 \% \cdot \text{Länge}$
- **fein (f)**  
Ist zwischen Hersteller und Anwender zu vereinbaren.

## Zylinderform (D)

Definition:

Die **Zylinderformtoleranz** ist der Abstand zweier coaxialer Zylinder, zwischen denen alle Punkte der Zylindermantelfläche liegen müssen.

Die festzulegende Zylinderformtoleranz hängt von der Art des keramischen Werkstoffes (Typ), der Gestalt des Werkstücks und dem Fertigungsverfahren ab. Die Werte für die Zylinderformtoleranz sind zwischen Hersteller und Anwender zu vereinbaren.

### 10.3.3.2 Keramik hartbearbeitet

Bei Bauteilen aus Technischer Keramik für Maschinenbauanwendungen genügen die vorher genannten Toleranzen für Funktionsflächen<sup>32</sup> oft nicht den Anforderungen der Anwender. Aus diesem Grund werden für keramische Teile Toleranzen gemäß

#### **DIN ISO 2768-m-K**

angegeben, die mittels Hartbearbeitung erreichbar sind.

#### **Zeichnungsangaben**

Ist für die Geradheit ein anderer Genauigkeitsgrad erforderlich als für Form angegeben, so ist dieser in diesem Feld zusätzlich anzugeben.

z. B.: Allgemeintoleranz DIN 40 680-A-m  
Allgemeintoleranz DIN 40 680-B-g

Für Ebenheit und Zylinderform gelten die Regeln für Bezeichnung und Zeichnungsangabe entsprechend.

---

<sup>32</sup> Siehe S. 213.

## Anhang

Für weitere Details und Beispiele siehe DIN 40680.

Herstellungsverfahren	Genauigkeitsgrad	
	grob (g)	mittel (m)
gegossen, gedreht, stranggepresste Teile von 30 mm und mehr	+	
stranggepresste Teile bis 30 mm, undosiert gepresst, dosiert halb- feucht gepresst, dosiert trocken gepresst, weiß- bearbeitet		+
Nenntoleranzbereich für Längen $L$ in mm	Geradheitstoleranz $f_a$ in mm	
	grob (g)	mittel (m)
bis 30	1,7	0,15
über 30 bis 40	1,8	0,20
über 40 bis 50	1,9	0,25
über 50 bis 60	2,0	0,30
über 60 bis 70	2,1	0,35
über 70 bis 80	2,1	0,40
über 80 bis 90	2,2	0,45
über 90 bis 100	2,3	0,50
über 100 bis 110	2,4	0,55
über 110 bis 125	2,5	0,60
über 125 bis 140	2,6	0,70
über 140 bis 155	2,7	0,80
über 155 bis 170	2,9	0,85
über 170 bis 185	3,0	0,90
über 185 bis 200	3,1	1,00
über 200 bis 250	3,5	1,25
über 250 bis 300	3,9	1,50
über 300 bis 350	4,3	1,75
über 350 bis 400	4,7	2,00
über 400 bis 450	5,1	2,25
über 450 bis 500	5,5	2,50
über 500 bis 600	6,3	3,00
über 600 bis 700	7,1	3,50
über 700 bis 800	7,9	4,00
über 800 bis 900	8,7	4,50
über 900 bis 1.000	9,5	5,00
über 1000	$1,5 + 0,8\% * L$	$0,5\% * L$

**Tabelle 31:** Allgemeintoleranzen für die Geradheit

## 10.3.4 Praxisbeispiele nach dem Stand der Technik

Viele Hersteller keramischer Bauteile haben in den von ihnen bedienten Marktsegmenten spezielles Know-how entwickelt, das es ermöglicht, Bauteile mit engeren Toleranzen als nach DIN 40 680 **ohne** zusätzliche Hartbearbeitung herzustellen. Das führt dazu, dass Kosten für eine Hartbearbeitung entfallen und das Bauteil kostengünstiger herstellbar wird.

An den folgenden Beispielen soll verdeutlicht werden, wie sich der Stand der Technik im Vergleich zu den oben genannten Toleranzen nach DIN 40 680 heute darstellt.

### 10.3.4.1 Verschleißschutzplatten

Diese Platten werden in großen Stückzahlen auf Stoß verlegt und mit dem Untergrund verklebt, um Oberflächen gegen Verschleiß zu schützen.

Hierfür sind enge Maßtoleranzen der Einzelplatten notwendig, um die Summentoleranz aneinander liegender Platten in Grenzen zu halten.

Ein typisches Plattenmaß ist dabei 100 x 100 mm. Diese Platten werden im Trockenpressverfahren hergestellt und nach dem Brand nicht mehr bearbeitet.

Nach DIN 40 680-A-m wäre eine Toleranz von  $\pm 1,8$  mm oder  $\pm 1,8$  % pro Platte zulässig.

Stand der Technik ist hier eine Summe der Längentoleranzen, die bei 10 aneinander gelegten Platten + 2 mm / - 0 mm oder + 0,2 % / - 0 % nicht übersteigt.

### 10.3.4.2 Platten als Brennhilfsmittel

Eine gegossene Platte hat die Abmaße 500 x 350 x 6 mm, die Diagonale ergibt eine Länge von ca. 610 mm. Nach DIN 40 680-C-g wäre eine Ebenheitsabweichung über die Diagonale von 7,1 mm oder 1,16 % zulässig.

Stand der Technik sind bei diesen Platten Ebenheitsabweichungen von max. 1,3 mm oder 0,2 %.

### 10.3.4.3 Transportrollen für Rollenöfen

In Rollenöfen wird der Transport der Ware durch den Ofen mit einem Rollenteppich realisiert. Die zu brennende Ware steht auf Platten, die wiederum auf den langsam rotierenden Rollen durch den Ofen befördert werden.

An die Gleichmäßigkeit und Geradheit dieser Rollen werden hohe Anforderungen gestellt, da „krumme“ Rollen zu ungleichmäßigen Fördergeschwindigkeiten, zum Verschieben der Platten untereinander und letztlich zur Störung führen können.

Für das Rollenmaß  $\varnothing = 40 \text{ mm}$  und  $l = 2.500 \text{ mm}$  wird deutlich, wie nach heutigem Fertigungsstandard die Werte nach DIN 40 680 unterschritten werden.

Dies verdeutlicht Tabelle 32, in der DIN 40 680 dem Stand der Technik gegenübergestellt wird. Dabei müsste nach DIN 40 680 für die Ermittlung der Toleranzen laut Tabelle 29 der Genauigkeitsgrad „grob“ zugrunde gelegt werden, da das Bauteil einen Durchmesser  $> 30 \text{ mm}$  aufweist. Aus den Tabellen 30 für Maßtoleranzen und Tabelle 31 für Formtoleranzen sind die nachfolgend angegebenen Normtoleranzen entnommen.

	Toleranz für	Toleranzen nach DIN 40 680	Stand der Technik
<b>Silicium-carbid</b>	$\varnothing D$	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 0,5 \text{ mm}$
	Länge	$\pm 50 \text{ mm}$	$\pm 1,5 \text{ mm}$
	maximale Durchbiegung	21,5 mm	2,0 mm
<b>Oxid-keramik</b>	$\varnothing D$	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 0,4 \text{ mm}$
	Länge	$\pm 50 \text{ mm}$	$\pm 1,0 \text{ mm}$
	maximale Durchbiegung	21,5 mm	1,5 mm

**Tabelle 32:** Gegenüberstellung der Toleranzwerte nach DIN 40 680 („grob“) mit üblichen Fertigungstoleranzen (unbearbeitet) für eine Transportrolle  $\varnothing = 40 \text{ mm}$  und  $l = 2.500 \text{ mm}$

## 10.4 Abstimmung von Prüfverfahren

In jedem Falle ist es unerlässlich, dass sich Anwender und Hersteller frühzeitig auf notwendige und wirtschaftlich erzielbare Toleranzen verständigen. Ebenso wichtig ist es, dass gleiche Messverfahren (nach Möglichkeit genormte Messverfahren) zur Beurteilung der Bauteile abgesprochen werden.

### Beispiel 1:

Die Geradheit von großvolumigen Bauteilen (Platten, Balken usw.) wird in der Regel statisch nach DIN 40 680 gemessen (siehe Bild 209 und 210). Es kann zweckmäßig sein, dass die Qualität von rotationssymmetrischen Teilen wie z. B. Transportrollen aussagekräftiger über eine dynamische Messung erfolgt. Dazu wird die Rolle einmal um ihre eigene Rotationsachse gedreht und die gesamte Auslenkung gemessen. So kann man sowohl Fehler in der Geradheit als auch in der Ovalität feststellen. Beides hat Einfluss auf den späteren Einsatz des Bauteils.

Wird die Art der Messung nicht vorher angegeben, so entsteht ein breites Interpretationsfeld für Kunden und Hersteller mit entsprechenden Reibungspunkten.

### Beispiel 2:

Dichtscheiben oder Dichtringe aus Keramik werden nach der so genannten Interferenzmethode auf ihre Ebenheit geprüft. Es handelt sich dabei um ein optisches Messverfahren, mit dem Ebenheitsabweichungen einer Oberfläche  $< 1 \mu\text{m}$  sichtbar gemacht werden können. Dabei wird ein Lichtstrahl definierter Wellenlänge (monochromatisches Licht) durch ein Planglas auf das Bauteil geleitet. Das Licht wird an der Bauteiloberfläche reflektiert. Kleinste Unebenheiten führen dazu, dass der Lichtstrahl auf seinem Rückweg im Planglas unterschiedlich gebeugt wird und so Fehler sichtbar und messbar gemacht werden.

Die verwendeten Plangläser sind nach unterschiedlichen Genauigkeitsklassen eng normiert.

Bis vor ca. 15 Jahren wurden Heliumdampflampen zur Erzeugung des monochromatischen Lichts eingesetzt. Aus unterschiedlichen Gründen haben sich seitdem mehr und mehr Natriumdampflampen etabliert. Es sind so zweierlei Lichtquellen am Markt vertreten. Aufgrund der unter-

schiedlichen Wellenlänge von Helium und Natrium (farblich mit dem Auge nur von Spezialisten zu unterscheiden) ergeben beide Lichtquellen unterschiedliche Messergebnisse bei denselben Bauteilen. Das Beispiel zeigt, dass mit enger werdenden Toleranzen nicht nur gleiche Messverfahren, sondern auch gleiche Messmittel notwendig werden!

## 10.5 Messverfahren

### 10.5.1 Biegefestigkeit

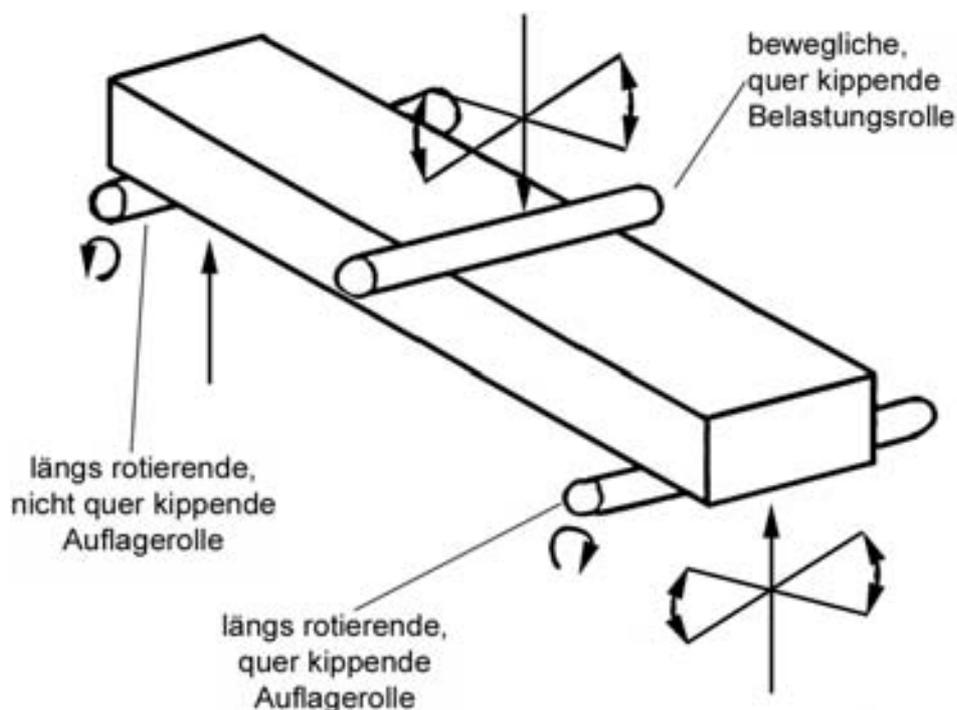
Die bei einer Biegeprüfung festgestellte Bruchfestigkeit hängt von vielen Faktoren ab, zu denen Probekörperabmessungen, Querschnittsgeometrie, Oberflächenbeschaffenheit, Belastungsgeschwindigkeit, Umgebungsfeuchtigkeit, Geometrie des Prüfgeräts und Vorgehensweise gehören. Das Ergebnis einer solchen Prüfung liefert einen Anhaltswert über die **Größenordnung der Festigkeitseigenschaften** des Werkstoffs, kann aber **nicht** direkt als **Konstruktionsgrundlage** herangezogen werden. Es eignet sich für die Qualitätssicherung und für den breit angelegten Vergleich verschiedener Werkstoffe, vorausgesetzt, dass alle oben genannten Parameter konstant sind. In der Praxis werden der 3-Punkt-Biegeversuch und der 4-Punkt-Biegeversuch eingesetzt.

Die für die Prüfung erforderliche Vorrichtung besteht aus

- mechanischen Prüfmaschinen, durch die eine Last auf einen Probekörper mit konstanter Laststeigerungsrate aufgebracht werden kann und die eine Erfassung der Lastspitze mit einer Genauigkeit von  $\pm 1\%$  erlaubt,
- einer Probenbelastungsvorrichtung, deren Geometrie und Abmessungen für die Prüfung geeignet sind,
- einem Feinlängenmessgerät entsprechend ISO 3 611, mit dem Probenmessungen auf  $\pm 0,01$  mm genau gemessen werden können,
- einem Distanzmikroskop, einer ISO 6 906 entsprechenden Schiebellehre oder einem sonstigen Messgerät, um den Abstand zwischen der Mittelachse der Probekörperauflagen und der Belastungsstäbe auszumessen.

### 10.5.1.1 3-Punkt-Biegefestigkeit

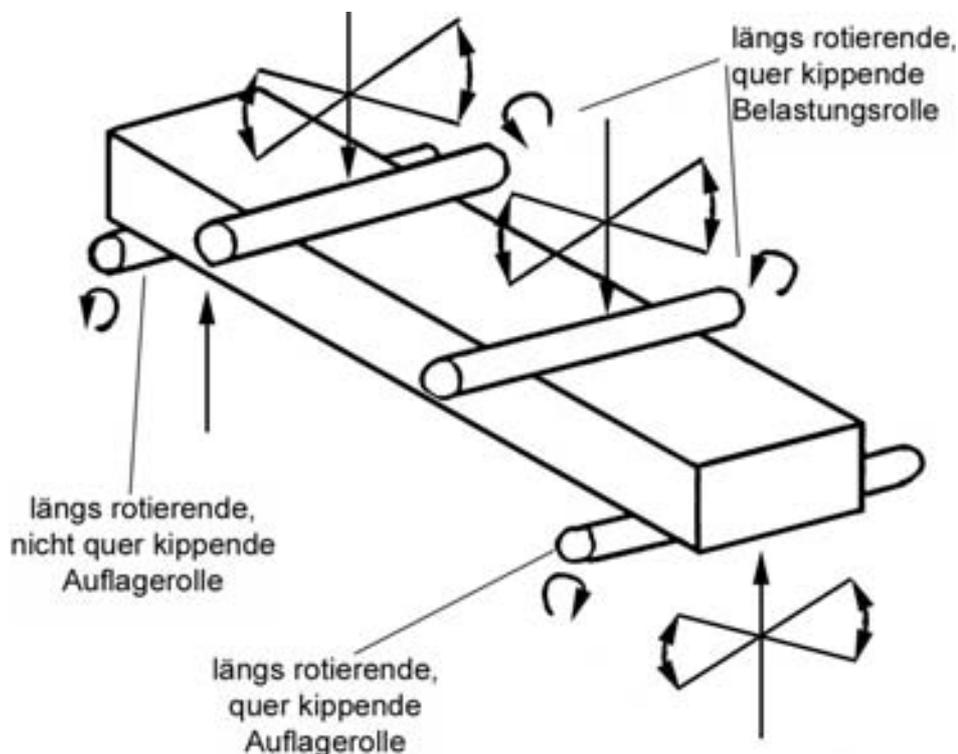
Die Belastungsvorrichtung besteht aus zwei parallel angeordneten Auflagestäben für Prüfkörper und einem Belastungsstab, der mittig zwischen den Auflagestäben die Last auf den Probekörper aufbringt. Die Auflagestäbe müssen frei gelagert sein, sodass sie um ihre Längsachse rotieren können, um Reibungseinflüsse zu minimieren. Einer der beiden Auflagestäbe muss außerdem um eine Achse rechtwinklig dazu, parallel zur Längsachse des Probekörpers, rotieren können, um dem Probekörper bei der Belastung ein Ausrichten zu ermöglichen. Der Belastungsstab muss eine ähnliche Rotationsachse aufweisen, um die gleichmäßige Belastung der gesamten Prüfkörperbreite zu gewährleisten. Der Durchmesser von Auflage- und Belastungsstäben und der Abstand zwischen den Mittelachsen der Auflagestäbe (die Stützweite) ist Tabelle 33 zu entnehmen; zudem muss ihre Oberfläche blank und gratfrei gehalten werden. Die Last wird senkrecht zur Probekörper-ebene und/oder Auflageebene aufgebracht. Ein typischer Aufbau der Vorrichtung wird in Bild 212 gezeigt.



**Bild 212:** Prinzipaufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs

### 10.5.1.2 4-Punkt-Biegefestigkeit

Das Prüfgerät besteht wie bei dem 3-Punkt-Biegeverfahren aus zwei Auflagern, bei identischen Spezifikationen. Zwei Belastungsstäbe, deren Mittelachsenabstand die Hälfte der Stützweite beträgt (siehe Tabelle 33) sind symmetrisch auf  $\pm 0,2$  mm genau zwischen den Auflagestäben angebracht, und die Last wird rechtwinklig auf den Probekörper übertragen. Die beiden Belastungsstäbe müssen um ihre Längsachse frei rotieren können und zudem unabhängig voneinander um eine Achse parallel zur Längsachse der Probekörper rotieren können. Auf diese Weise kann eine optimale Ausrichtung der Belastungs- und Auflagestäbe erreicht werden.



**Bild 213:** Prinzipaufbau des 4-Punkt-Biegeversuchs

Die Probekörper müssen nach den in Tabelle 33 und Bild 213 angegebenen Abmessungen entsprechend ihrer Gruppeneinteilung angefertigt werden (siehe DIN EN 60 672-1 und DIN EN 843-1). Die Probenherstellung sollte an das zu erwartende Bauteilherstellungsverfahren angepasst werden (siehe S. 70–76). Jede Oberflächenbehandlung, wie Schleifen, Scheuern etc., sollte vermerkt werden und der Oberfläche des Bauteils entsprechen, da die Bruchfestigkeit von Keramiken durch

die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst werden kann. Die Mindestprobenkörperanzahl für jede Prüfung beträgt 10.

Werkstoffgruppe	Werkstoffuntergruppe	Probenkörperabmessungen in mm				Verfahren	Abmessungen der Vorrichtung in mm	
		Länge	Stabdurchmesser d	abgeflacht hxb	rechteckig hxb		Stützweite	Rollendurchmesser
C 100	alle außer C 111	120	10	-	-		100	10
	C 111	120	-	10 x 8	10 x 10	3-Punkt	100	10
C 200	alle	120	10	10 x 8	10 x 10	3-Punkt	100	10
C 300	alle	50	5	-	3 x 4	3-Punkt	40	5
C 400	alle	120	10	10 x 8	10 x 10	3-Punkt	100	10
C 500	alle	120	10	10 x 8	10 x 10	3-Punkt	100	10
C 600	alle	120	10	10 x 8	10 x 10	3-Punkt	100	10
C 700	alle	50	5	-	3 x 4	beide	40	5
C 800	C 810	20	5	-	3 x 4	beide	40	5
	C 820	120	10	-	10 x 10	3-Punkt	100	10
C 900	alle	50	5	-	3 x 4	beide	40	5

**Tabelle 33:** Festigkeitsprobenkörper und Prüfgerätdimensionen

### 10.5.2 Härte

Für die Härtemessung von Keramik eignen sich nur Verfahren nach Vickers und Knoop. Die anderen Härtemessverfahren erfüllen entweder nicht die Voraussetzungen für harte und spröde Werkstoffe, wie z. B. große Härte des Indenters und kleine Prüfkräfte, oder sie sind prüftechnologisch noch nicht genügend entwickelt. Die Bewertung des Indentereindrucks im Sinne der für metallische Werkstoffe üblichen Ermittlung der Vickers- oder Knoophärte erreicht bei keramischen Werkstoffen die Grenzen der Anwendbarkeit, d. h., es ergeben sich eine Reihe verfahrenstechnischer bzw. werkstoffspezifischer Probleme. Deshalb kommen auch Verfahren mit geänderter Methodik wie etwa das

- UCI-Verfahren (Ultrasonic Contact Impedance) oder die
- Universalhärtemessung zum Einsatz.

Die Basis des **UCI-Verfahrens** ist die Änderung der Resonanzfrequenz einer Prüfsonde beim Eindringvorgang, an deren Spitze sich der Vickersindenter befindet. Die Frequenzänderung ist ein Maß für die Oberfläche des Eindrucks und damit für die Härte des Werkstoffs.

Die Änderung der Resonanzfrequenz des Schwingstabes ist aber auch von den Elastizitätsmodulen des Indenters und der Probe abhängig, die durch andere Verfahren zu ermitteln sind. Daraus ergeben sich werkstoffspezifische Kalibrierfunktionen.

Umgekehrt kann bei bekannter Härte des Werkstoffs der E-Modul mit dem UCI-Verfahren ermittelt werden.

Die **Universalhärtemessung** beruht auf der Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Indenterkraft und der Eindringtiefe. Hierbei wird eine prüfkraftabhängige Härte unter Einbeziehung der elastischen und plastischen Verformung und eine prüfkraftunabhängige Härtezahl, welche die Bedingungen für rissfreie Eindrücke erfüllt, ermittelt.

Bei Werkstoffvergleichen ist darauf zu achten, dass die gleiche Meßmethode verwendet wurde.

## 10.5.3 E-Modul

Da eine werkstoffspezifische Abhängigkeit von Schallgeschwindigkeit, Porosität und E-Modul besteht, kann mit der Ultraschallprüfung der E-Modul zerstörungsfrei ermittelt werden. Diese Methode ist geeignet, kleine Fehler in der Keramik festzustellen. Dabei muss die Ultraschallmesstechnik aber hohe Anforderungen erfüllen können. Um Fehler von  $100\ \mu\text{m}$  nachzuweisen, sind eine Frequenz von 100 MHz, stark fokussierende Prüfköpfe und Messverstärker notwendig.

## 10.5.4 Oberflächen

### 10.5.4.1 Definitionen

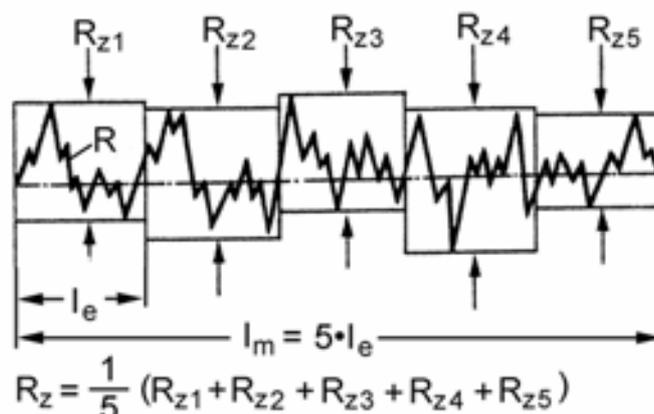
Die Oberflächen keramischer Werkstoffe weisen in den meisten Fällen keine regelmäßige Struktur auf, sondern enthalten Gestaltsabweichungen, die unterteilt werden in Rauheit, Welligkeit und Formgestalt. Wichtige Kenngrößen für keramische Bauteile sind:

$R_a$  = Mittenrauwert,

$R_z$  = Rautiefe,

$M_r$  = Materialanteil, früher:  $t_p$  = Traganteil.

Die gemittelte **Rautiefe  $R_z$**  ist der Mittelwert aus Einzelrautiefen 5 aufeinander folgender Einzelmessstrecken im Rauheitsprofil. Die Extremwerte in jedem Messabschnitt werden addiert und die Spannweite durch die Anzahl der Messabschnitte dividiert.

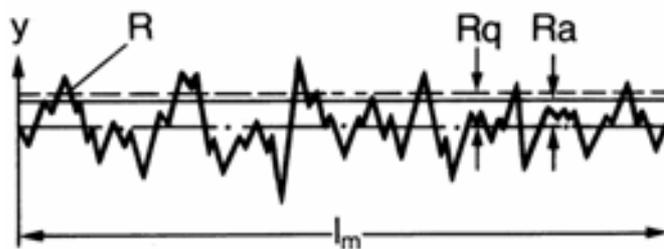


**Bild 214:** Berechnung der Rautiefe  $R_z$

## Anhang

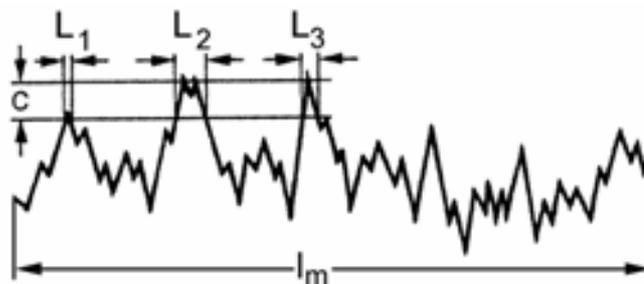
Der **Mittenrauwert**  $R_a$  ist der rechnerische Mittelwert aller Abweichungen des Rauheitsprofils von der mittleren Linie der definierten Bezugsstrecke.  $R_a$  entspricht theoretisch dem Abstand mehrerer Linien, die sich bilden, wenn die Berge oberhalb der Mittellinie und die Täler unterhalb der Mittellinie in gleich große Rechtecke verwandelt würden.

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y| dx \quad R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2 dx}$$



**Bild 215:** Berechnung des Mittenrauwerths  $R_a$

Der **Materialanteil**  $M_r$  (früher: Traganteil  $t_p$ ) ist der Anteil der Auflagefläche (bestimmte Schnittlinie) zu der betrachteten Gesamtfläche (zu Bezugsstrecke) in %.



$$M_r = \frac{1}{l_m} (L_1 + L_2 + \dots + L_n) \cdot 100[\%]$$

**Bild 216:** Berechnung des Materialanteils  $M_r$

Bei optischen Verfahren ist  $M_r$  als Flächenverhältnis definiert.

$$M_r = \frac{\text{Fläche bis zu einer definierten Tiefe}}{\text{Gesamtfläche}}$$

Das optische Verfahren ist nicht genormt, wird aber oft praktiziert, da mit ihm schnell und mit hoher Genauigkeit gemessen werden kann.

Definitionen zu den genannten Kenngrößen sind in DIN EN ISO 1302 enthalten.

Für die Vergleichbarkeit von Oberflächenmessungen zwischen Hersteller und Kunde ist es wichtig, dass gleiche Messbedingungen herrschen. Von den entsprechenden Festlegungen sind Tastschnittgerät, Taster, Tastergeometrie, Messstrecke, Filter, Gerät und Geräteeinstellung sowie verwendete Oberflächenparameter betroffen. Tabelle 34 zeigt hierfür ein Beispiel mit Grundangaben.

Messgerät/Typ	Mahr, Perthometer S4P
Tastertyp	RHT 6-50 Einsatz bei planen Oberflächen, Mantelflächen und -länge (Rohre, Stäbe)  FRW 750 Einsatz bei gekrümmten Oberflächen, Radien sowie in kleinen Bohrungen, Absätzen, Nuten und Kanälen  FRW 750/S Einsatz bei gekrümmten Oberflächen, Radien sowie in kleinen Bohrungen, Absätzen, Nuten und Kanälen
Tastergeometrie	RHT 6–50; Spitzwinkel 90°, Radius 5 µm FRW 750; Spitzwinkel 90°, Radius 10 µm FRW 750/S; Spitzwinkel 90°, Radius 3-5 µm
Messstrecke	Lt: 5,5 mm Lm: 4 mm
Filter	LC Gaus Lambda 0,8 mm
Kenngrößen für Dichtflächen	$R_a$ , $R_z$ , ( $R_p$ , $R_{max}$ , $M_r$ )
Maßstab	Horizontalmaßstab: 500 µm Vertikalmaßstab: 10 µm
Messort	nach Zeichnung bzw. Prüfplan (entsprechend Markierung XXX in der Zeichnung)

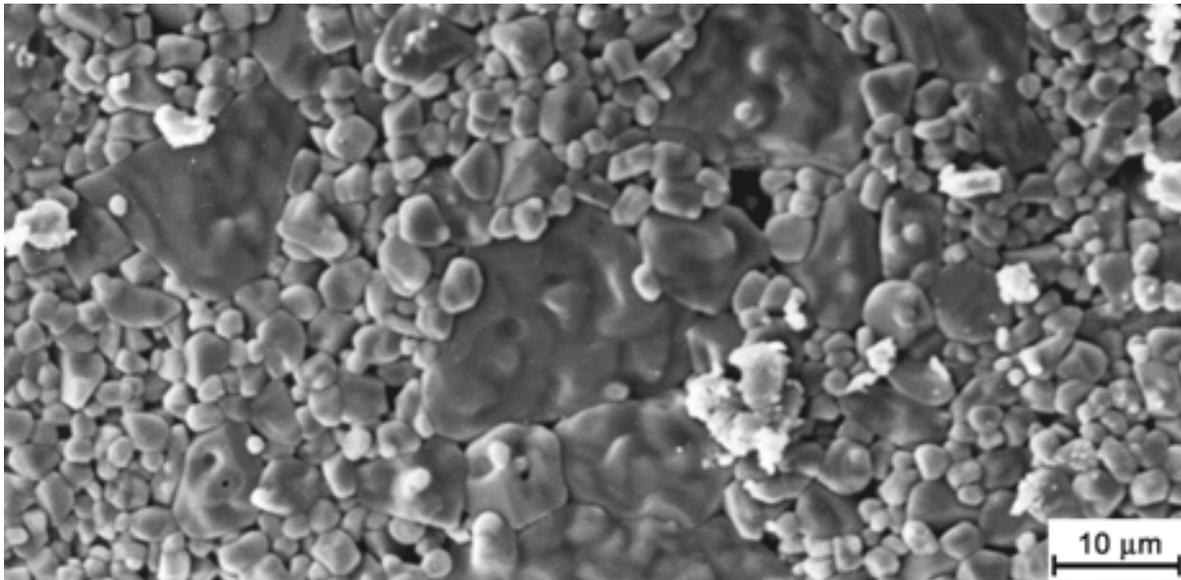
**Tabelle 34:** Beispiel für die Festlegung von Messbedingungen

Die folgenden Beispiele für Oberflächen (siehe S. 234f.), Materialanteile (siehe S. 236) und Oberflächenprofile (siehe S. 237f.) sollen einen Eindruck von den Charakteristika keramischer Oberflächen vermitteln.

### 10.5.4.2 Hartbearbeitete Oberflächen

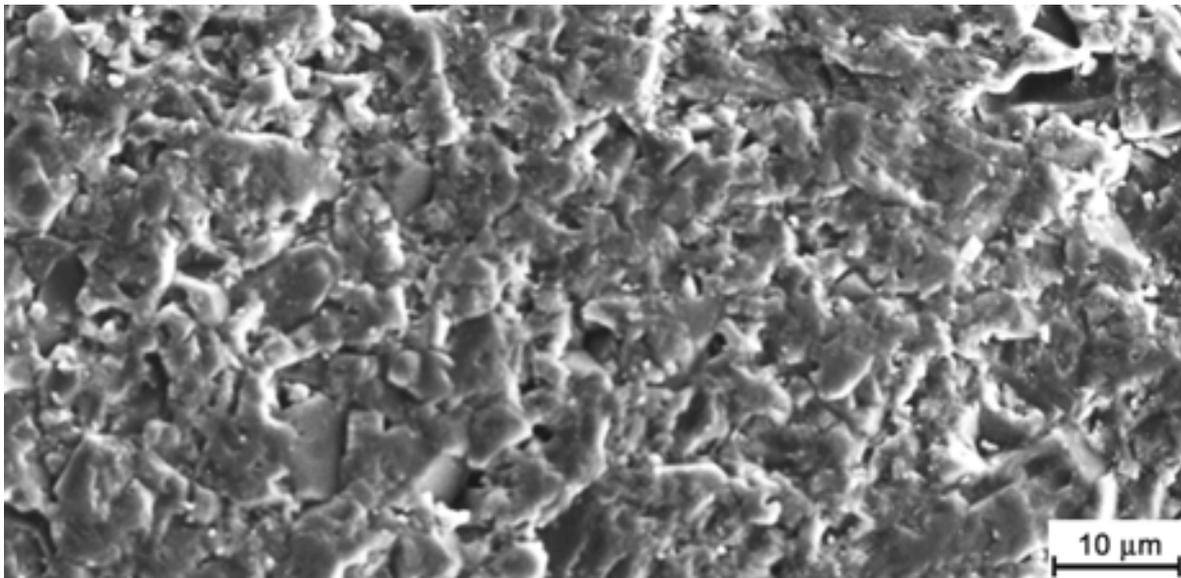
„Werkstoff: *Aluminiumoxid 96 %*“

- **Oberfläche nach dem Sintern**



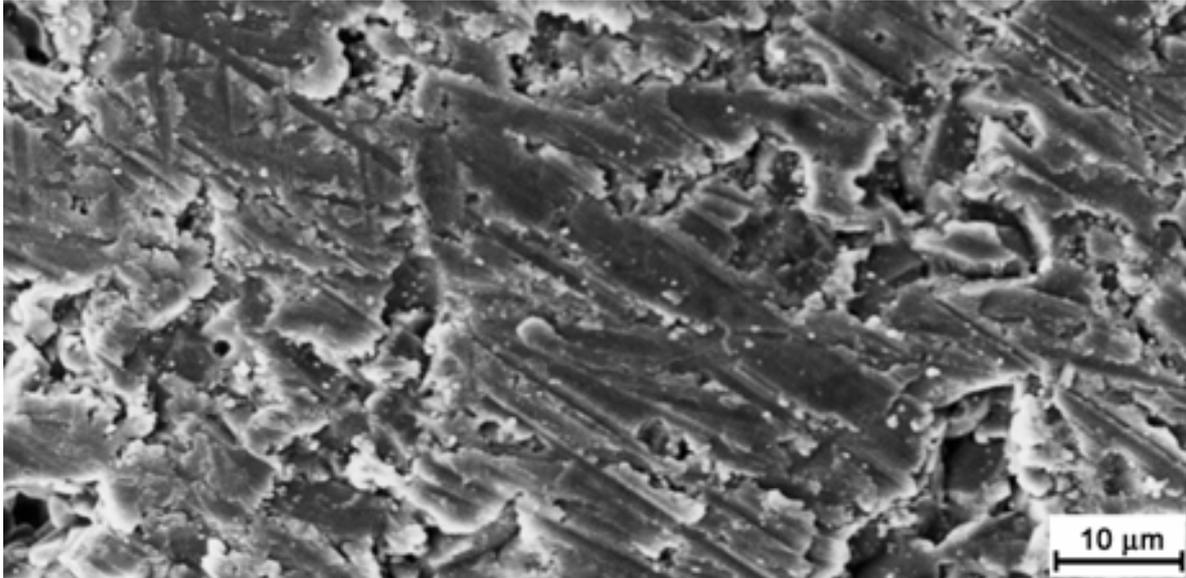
**Bild 217:** „as fired“, V = 1.000

- **Gescheuerte Oberfläche**



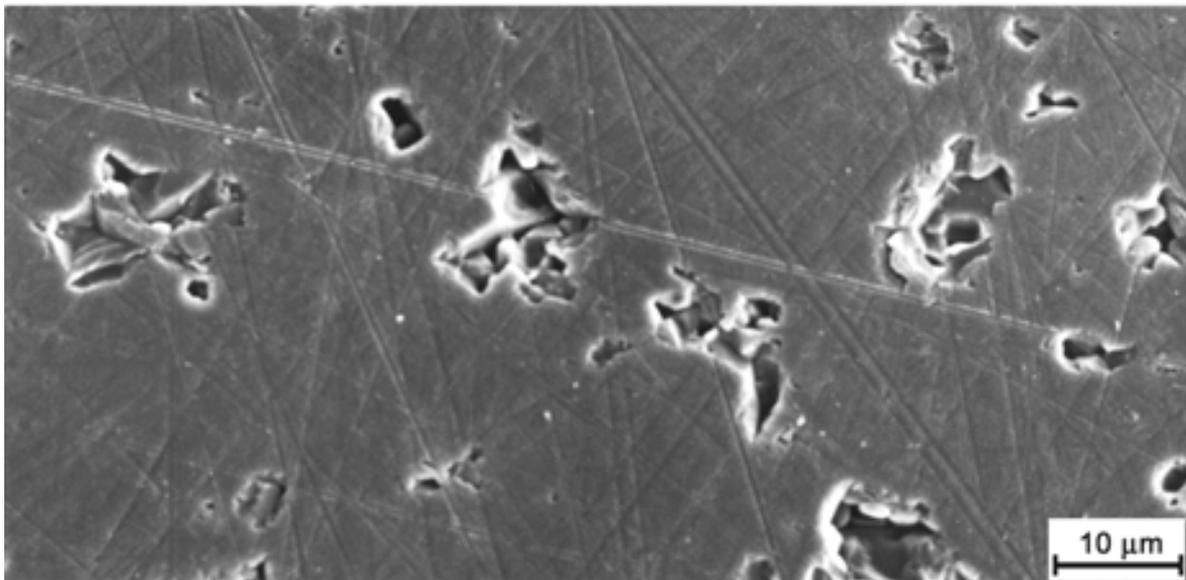
**Bild 218:** gescheuert, V = 1.000

- **Geschliffene Oberfläche**



**Bild 219:** geschliffenen, V = 1.000

- **Polierte Oberfläche**



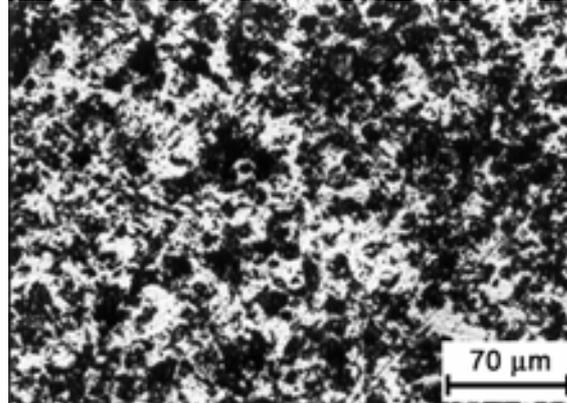
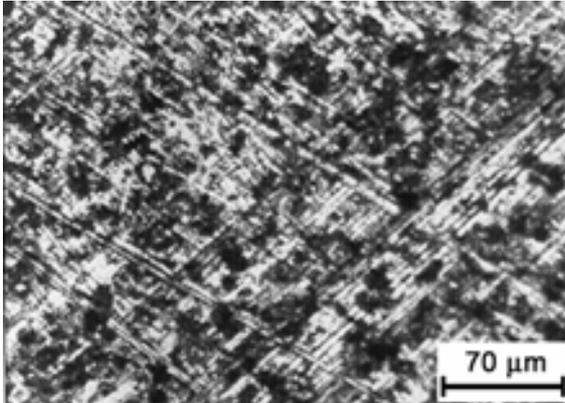
**Bild 220:** poliert, V = 1.000

### 10.5.4.3 Materialanteile/(Traganteile) $M_r$

Werkstoff: *Aluminiumoxid 96 %*

---

35 %  $M_r$

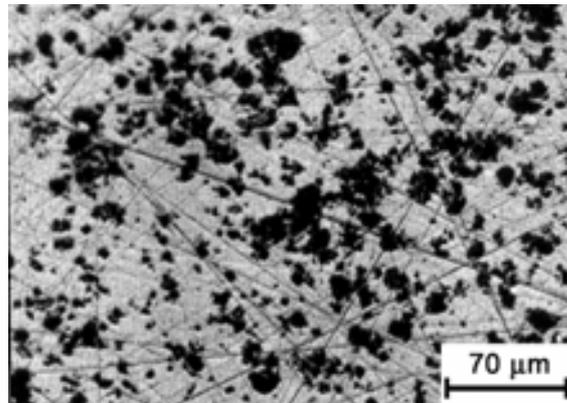
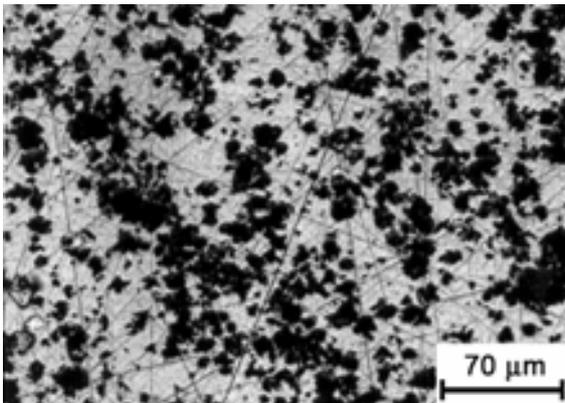


**Bild 221:** geschliffen,  $V = 140$

**Bild 222:** kurz poliert,  $V = 140$

60 %  $M_r$

70 %  $M_r$

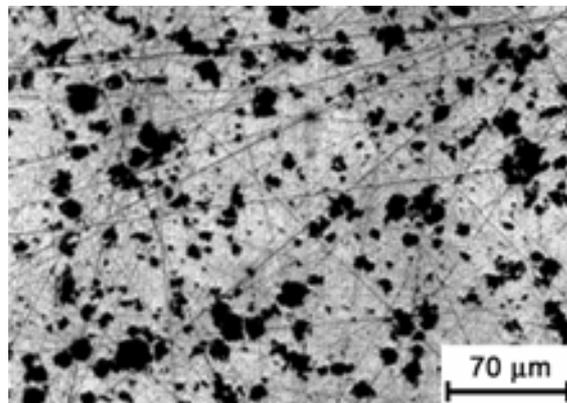
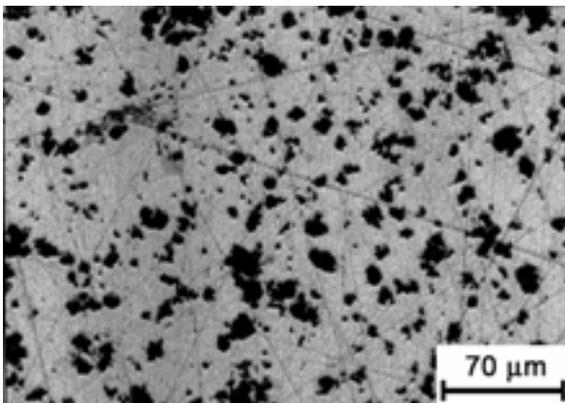


**Bild 223:** mittellang poliert,  $V = 140$

**Bild 224:** lang poliert,  $V = 140$

75 %  $M_r$

80 %  $M_r$



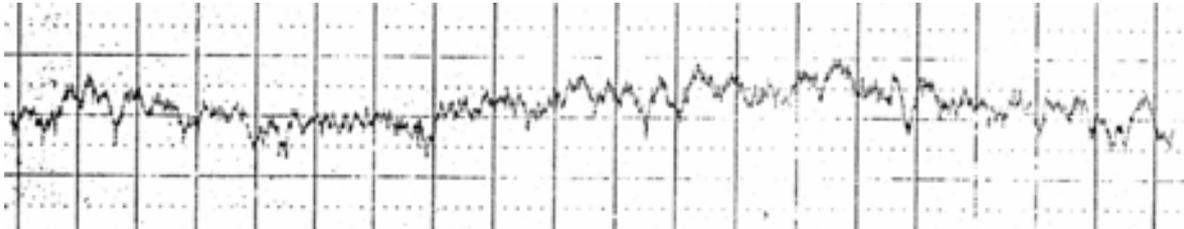
**Bild 225:** fertig poliert,  $V = 140$

**Bild 226:** fein poliert,  $V = 140$

#### 10.5.4.4 Rauheitsprofile

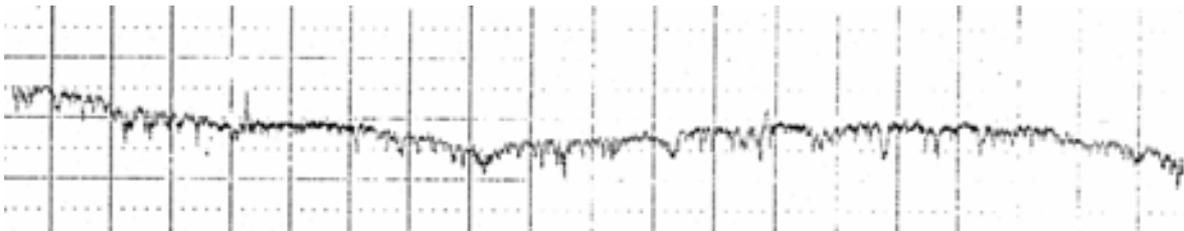
Werkstoff: *Aluminiumoxid 96 %*

- **Oberfläche nach dem Sintern**



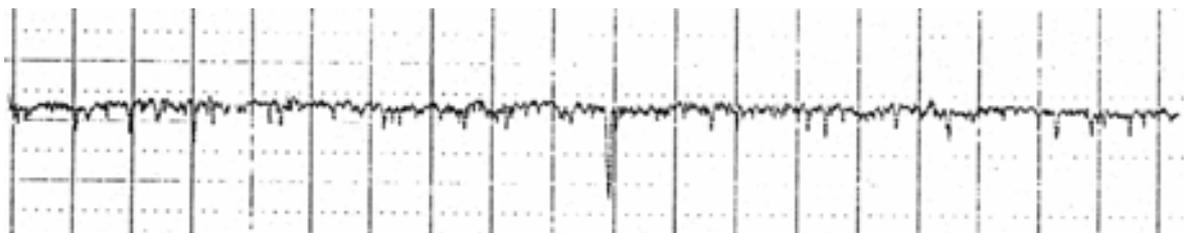
**Bild 227:** Rauheitsprofilmessung nach dem Sintern mit  
 $R_a = 0,7 \mu\text{m}$        $R_z = 4,8 \mu\text{m}$

- **Oberfläche gescheuert**



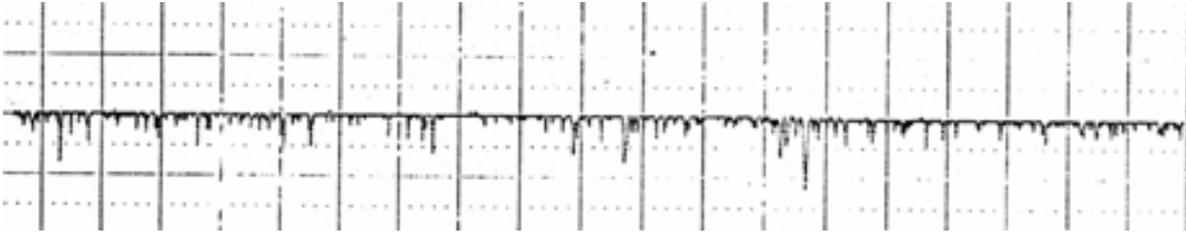
**Bild 228:** Rauheitsprofilmessung nach dem Scheuern mit  
 $R_a = 0,35 \mu\text{m}$        $R_z = 3,6 \mu\text{m}$

- **Oberfläche geschliffen**



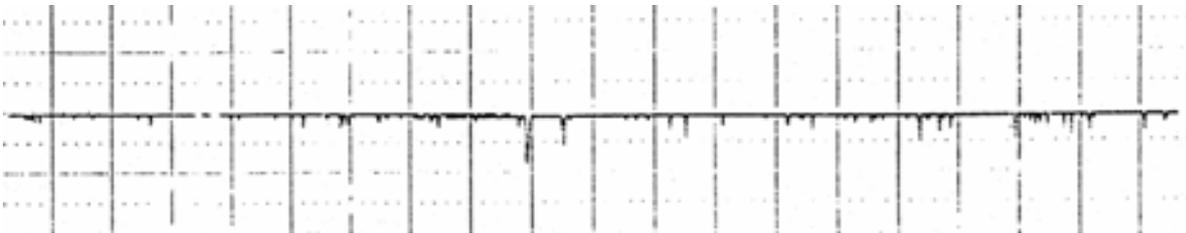
**Bild 229:** Rauheitsprofilmessung nach dem Schleifen mit  
 $R_a = 0,3 \mu\text{m}$        $R_z = 3,7 \mu\text{m}$

- **Oberfläche kurz poliert**



**Bild 230:** Rauheitsprofilmessung nach kurzem Polieren mit  
 $R_a = 0,23 \mu\text{m}$       $R_z = 3,6 \mu\text{m}$

- **Oberfläche lang poliert**



**Bild 231:** Rauheitsprofilmessung nach langem Polieren mit  
 $R_a = 0,1 \mu\text{m}$       $R_z = 2,1 \mu\text{m}$

## 10.6 Qualität

### 10.6.1 Statistische Auswertung – Übersicht

Zur angemessenen Analyse von Daten aus der Produktion und zur Lösung von Problemen helfen folgende Darstellungen:

#### **Klassifizierungen**

Für die Unterscheidung von Teilproblemen nach ihrer Wichtigkeit können protokollierte Fehler nach ihrer Priorität als Strichliste oder Balkendiagramm dargestellt werden (Pareto-Diagramm/ABC-Analyse).

#### **Zusammenhänge**

Die Auflistung möglicher Fehlerursachen und die Einordnung des Einflusses von Mensch, Methode, Maschine und Material für die Beurteilung von Ursachen und Wirkungen wird zweckmäßig im „Fischgrät“-Diagramm (Ishikawa) dargestellt.

#### **Verteilungen**

Die Umsetzung von Messreihen in ihre Verteilungsfunktion und deren Kennwerte (Mittelwert  $\bar{x}$ , Varianz  $\sigma$ ) charakterisieren den Vorgang und lassen Vorhersagen für nachfolgende Messwerte zu (Histogramm).

#### **Regelkarten**

Die grafische Darstellung von Messwerten in Abhängigkeit von der Zeit und von dazugehörigen Grenzwerten bietet Entscheidungshilfen bei der Prozessführung.

#### **Streudiagramme**

Die Darstellung von Einzelwerten, welche über zwei Einflussgrößen in Beziehung stehen, führt zur Beschreibung dieser Zusammenhänge.

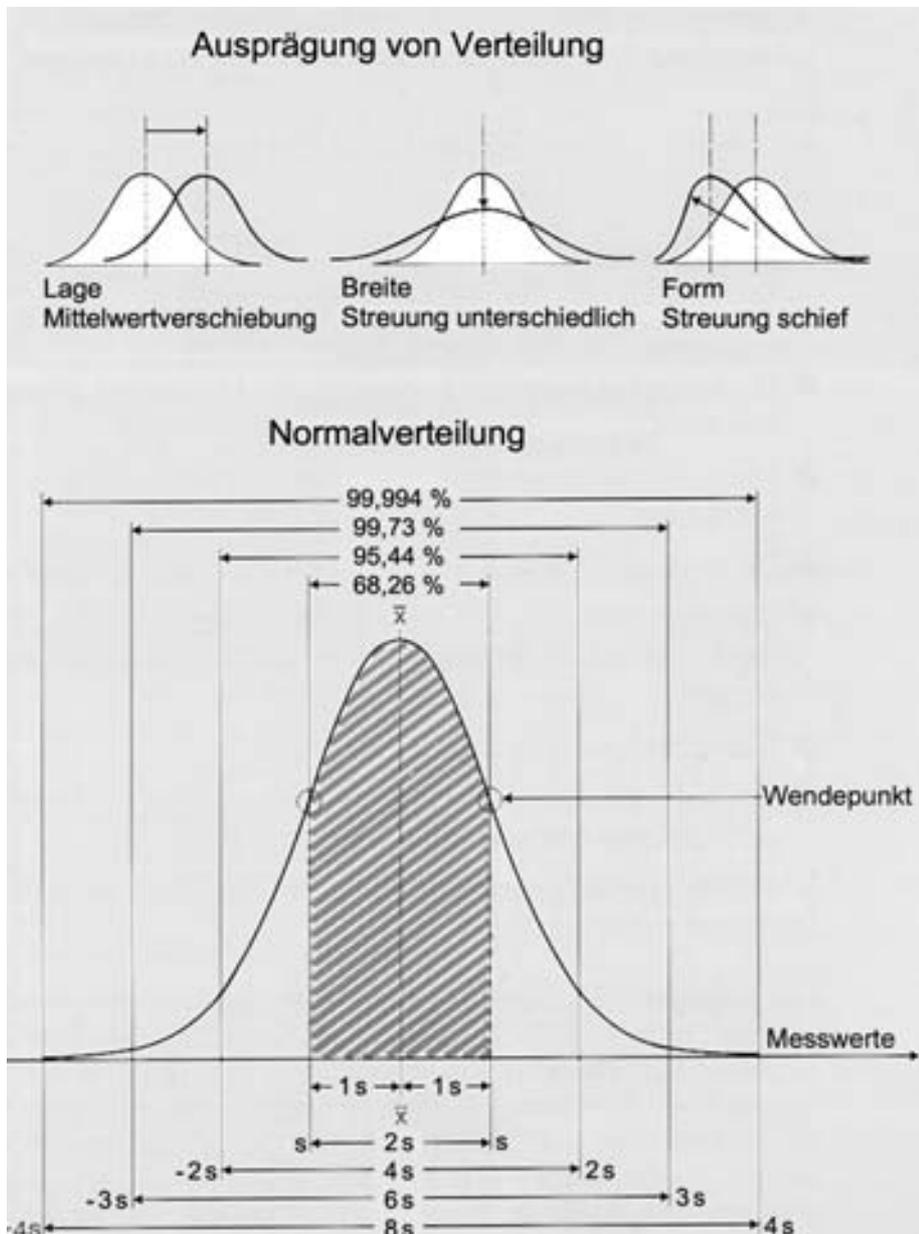
#### **Diagrammformen**

Bei der Analyse von Daten ist die anschauliche grafische Darstellung hilfreich; dabei üblich sind vor allem Linien-, Balken- und Kreisdiagramme.

## Anhang

### Prüfformulare

Diese dienen bei Routineprüfungen zur Darstellung von Ergebnissen in Tabellenform.



**Bild 232:** Ausprägung von Verteilungen und Normalverteilung

## 10.6.2 Statistische Methoden

### 10.6.2.1 Rechengrößen

Wenn man zur Überprüfung von vielen Teilen eine Stichprobe zieht, erhält man eine endliche Anzahl von Messwerten. Mit ausreichend vielen Messwerten kann man einen stetigen Kurvenverlauf zeichnen, der die Grundgesamtheit der Teile widerspiegelt, d. h. aller Teile, auch derjenigen, die nicht gemessen wurden.

Verteilungen unterscheiden sich in ihrem Kurvenverlauf hinsichtlich Lage, Breite und Form, die auch nebeneinander auftreten und sich überlagern können. Sehr häufig gehorchen Messwerte der **Normalverteilung**, auch **Gauß'sche Verteilung** oder, wegen ihrer Form, **Glockenkurve** genannt.

Die Normalverteilung wird durch zwei folgenden Kennwerte mathematisch beschrieben.

#### Arithmetischer Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

mit  $n$  = Anzahl der Messwerte und mit den Einzelwerten  $x_i$  von  $x_1$  bis  $x_n$

#### Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + (\bar{x} - x_3)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2}{n-1}}$$

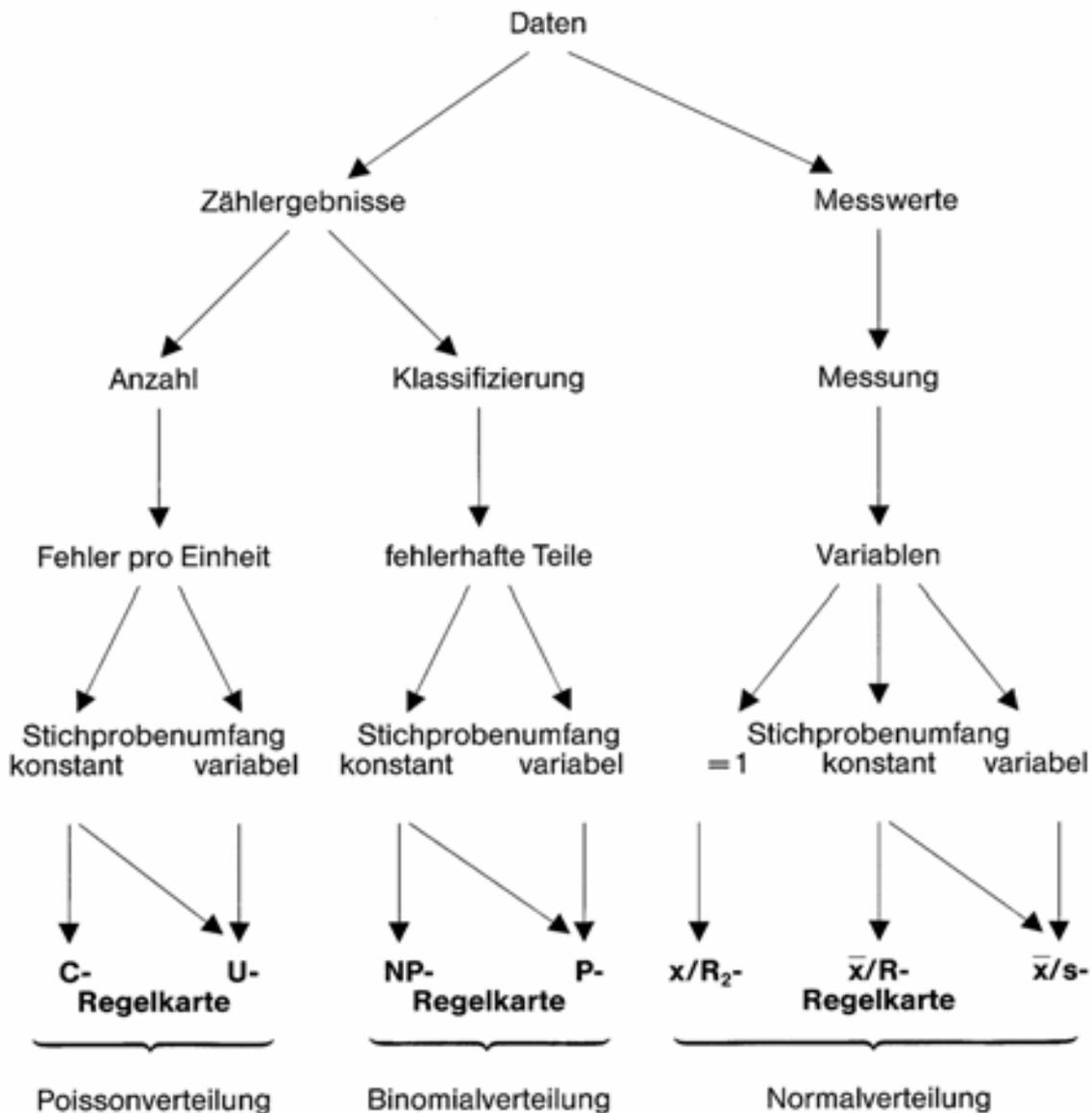
Der Mittelwert  $\bar{x}$  ist die Mitte der Normalverteilungskurve und kennzeichnet die Lage der Verteilung.

Die Standardabweichung  $s$  beschreibt die Streuung des Prozesses, sie ist ein Maß für die Breite einer Normalverteilungskurve und ist geometrisch der Abstand zwischen Mittelwert  $\bar{x}$  und dem Wendepunkt der Normalverteilung.

Die Fläche unterhalb der Normalverteilungskurve entspricht der Häufigkeit des Vorkommens von Messwerten. Im Bereich  $\pm 1 s$  um den

Mittelwert  $\bar{x}$ , also  $2s$ , entspricht die schraffierte Fläche unterhalb der Normalverteilungskurve 68,26 % aller Werte. Im Bereich  $\pm 3s$  um den Mittelwert, also  $6s$ , sind es 99,73 % aller Werte. Man definiert den Abstand von  $3s$  zum Mittelwert als **natürliche Prozessgrenzen**.

### 10.6.2.2 Regelkarten



**Bild 233:** Unterscheidung von Regelkarten

Regelkarten sind grafische Darstellungen der Messwerte in Abhängigkeit von der Zeit, wobei die Eingriffsgrenzen aus der Abfolge der Messwerte heraus berechnet und – als Linie eingezeichnet – zur weiteren Prozessführung von den Anlagenbedienern als Entschei-

derungshilfen verwendet werden. Hierbei werden neue Messwerte eingezeichnet, sofort interpretiert und zugehörigen Anmerkungen, z. B. über Änderungen oder Eingriffe in die Regelkarte eingetragen.

Für den industriellen Bereich sind kombinierte Regelkarten für Messwerte von besonderer Bedeutung, vor allem die **Mittelwert  $\bar{x}$ -** kombiniert mit der **Spannweite R-** oder der **Standardabweichung s-Karte**. R ist die Abkürzung für den englischen Begriff für Spannweite „range“.

### 10.6.2.3 Prozessfähigkeitsanalyse

Die Interpretation der Regelkarten wird mit Hilfe von statistischen Regeln vorgenommen. Die eindeutige Aussage lautet dann: Dieser Prozess ist in statistischer oder nicht in statistischer Kontrolle. Ein Prozess in statistischer Kontrolle ist stabil und vorhersagbar. Man kann dann seine Fähigkeit untersuchen, vorgegebene Spezifikationen zu erfüllen und entsprechende Kennwerte ermitteln. Einen solchen Kennwert bezeichnet man als **Fähigkeitsindex**.

Eine Aussage über die Streubreite eines Prozesses relativ zur Spezifikationsbreite, unabhängig von der Lage des Mittelwertes des betreffenden Produktmerkmals, ergibt den  **$c_p$ -Wert**. Dagegen ermöglicht der  **$c_{pk}$ -Wert** eine Aussage über Streubreite und Lage des Mittelwertes eines Prozesses relativ zu der am nächsten liegenden „kritischen“ Spezifikationsgrenze.

Die Minimalforderung ist, dass  $c_p$  bzw.  $c_{pk}$  größer als 1 sein sollen. Das bedeutet, dass der Bereich  $\bar{x} \pm 3s$  innerhalb der Spezifikationsgrenzen liegen muss.

$$c_p = \frac{OSG - USG}{6s}$$

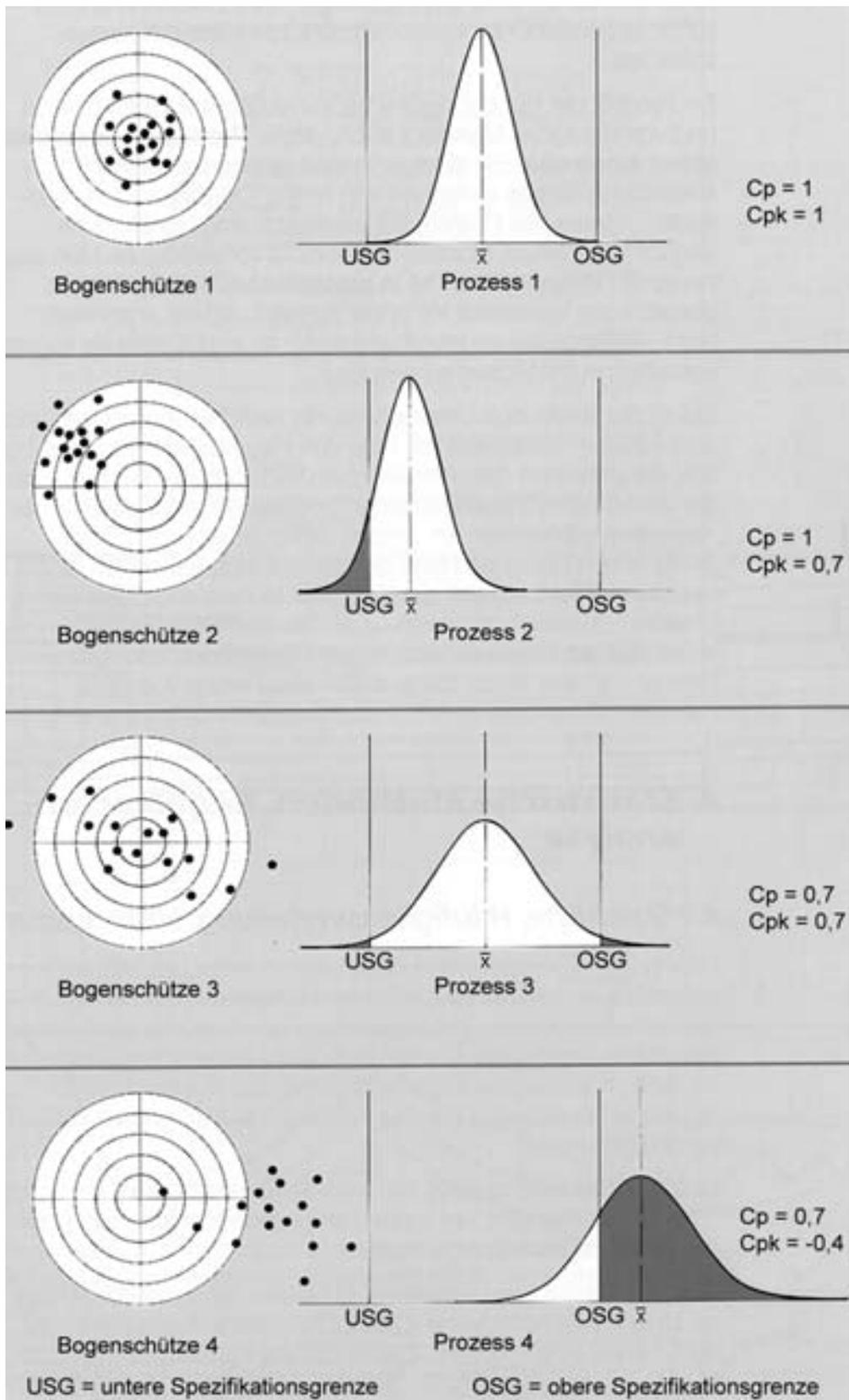
OSG = oberer Spezifikationsgrenze  
USG = untere Spezifikationsgrenze

$$c_{po} = \frac{OSG - \bar{x}}{3s}$$

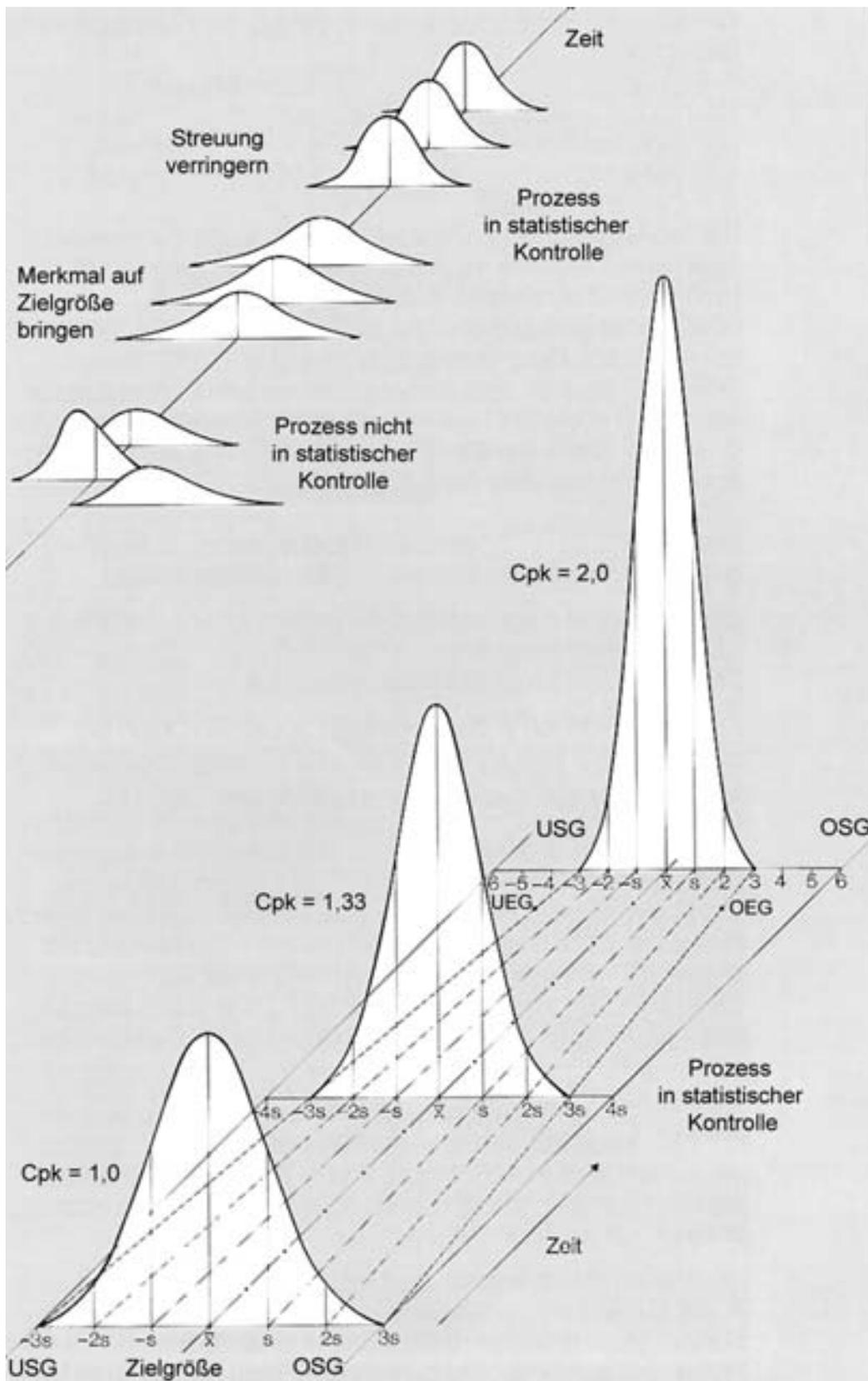
$$c_{pu} = \frac{\bar{x} - USG}{3s}$$

**$c_{pk}$** : der kleinere Wert von  $c_{po}$  oder  $c_{pu}$

# Anhang



**Bild 234:** Prozessfähigkeit



**Bild 235:** Verringerung der Streuung des Prozesses

### 10.6.3 Statistische Prozessführung

SPC ist eine Methode, Prozesse und Produkte ständig zu verbessern. SPC ist die Abkürzung von **Statistical Process Control** (Statistische Prozessregelung/**Statistische Prozessführung**).

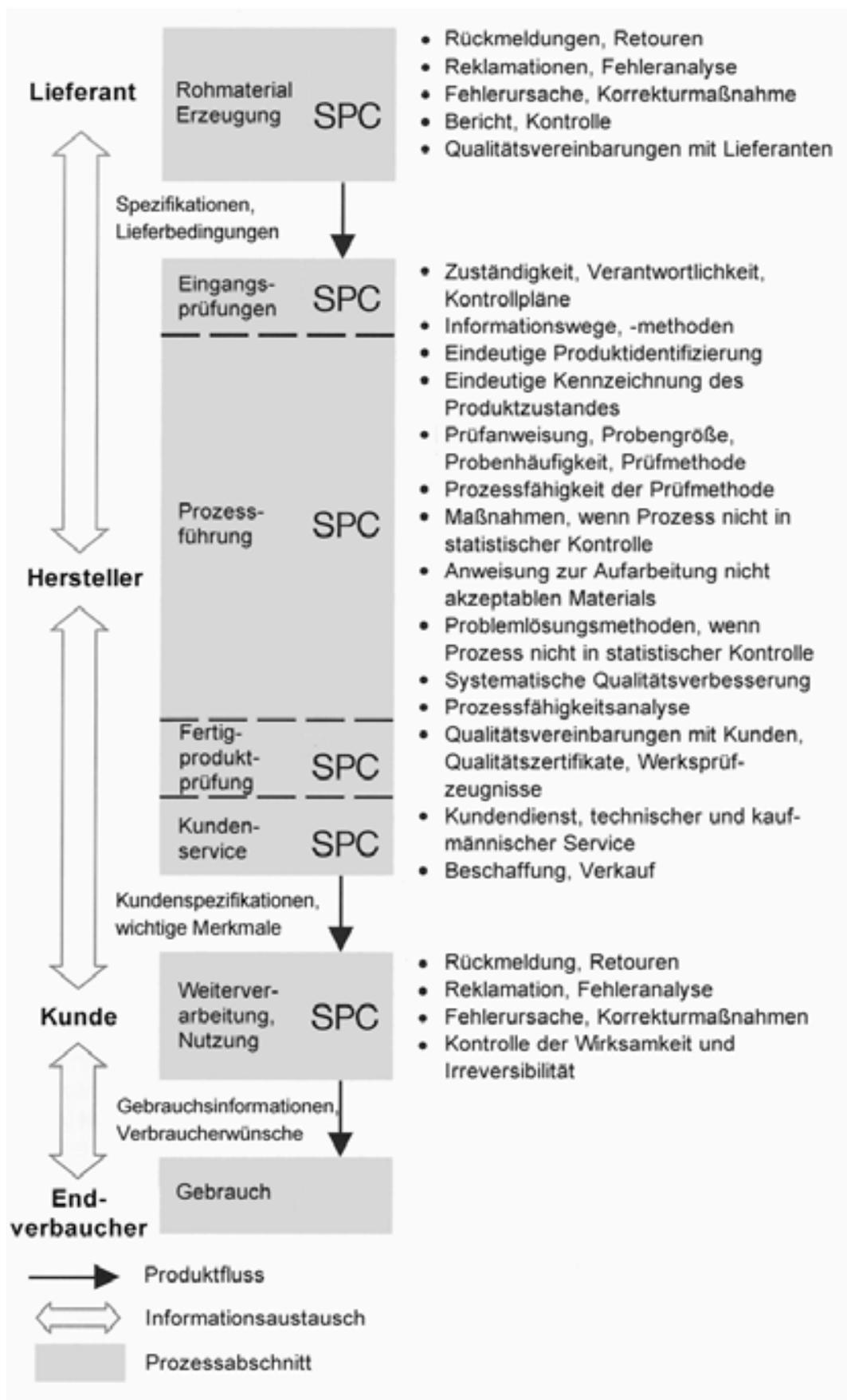
Unter *Prozess* versteht man alle sich wiederholenden Abläufe. Die SPC-Methodik ist deshalb z. B. auch in den Bereichen Beschaffung, Verkauf, Ingenieurwesen, Forschung und Entwicklung, Produktion und Verwaltung einsetzbar.

SPC dient

- dem Nachweis von produzierter Qualitätsleistung,
- der Prozessführung und
- der Diagnose im System der Problemanalyse und -lösung zur ständigen Qualitätsverbesserung.

Ein wichtiges Werkzeug für SPC ist die Regelkartentechnik.

Ein Prozess, der nur die natürliche Variabilität aufweist, ist stabil und vorhersagbar, dieser Prozess ist also in *statistischer Kontrolle*. Ein solcher Prozess ist eine wesentliche Voraussetzung für das Erreichen von bester Qualität. Ein Prozess, der zusätzlich eine unnatürliche Variabilität aufweist, ist instabil und nicht vorhersagbar, der Prozess ist nicht in statistischer Kontrolle. Die unnatürliche Variabilität tritt ohne Vorwarnung ein, man weiß nicht, wie lange sie andauert und wann sie endet, aber sie kommt mit Sicherheit irgendwann wieder. Mit Hilfe von Regelkarten wird es möglich, nach der Ursache der unnatürlichen Variabilität zu suchen. Die Wirksamkeit und Irreversibilität der Korrektur wird mittels Regelkarten nachgewiesen.



**Bild 236:** SPC und Qualitätssicherungssysteme

### 10.7 Normen zu Technischer Keramik

#### 10.7.1 Allgemein

DIN 40680-1	(08.83)	Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik; Allgmeintoleranzen für Maße
DIN 40680-2	(08.83)	Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik; Allgmeintoleranzen für Form
DIN 40686-1	(08.83)	Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Allgemeines
DIN 40686 Beiblatt 1	(08.83)	Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Angabe in Zeichnungen
DIN 40686 Beiblatt 2	(08.83)	Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Messungen der Rauheit
DIN 40686-4	(08.83)	Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Prüfung von wechlötbaren Metallbelägen
DIN 40686-5	(08.83)	Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Prüfung von hartlötbaren Metallbelägen
DIN 40686-6	(08.83)	Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Hoch- und Niederspannungs-Isolatoren
DIN 40686-7	(08.83)	Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik; Isolierteile
DIN EN 12212	(12.02)	Hochleistungskeramik – Einheitliches Verfahren zur Klassifizierung
DIN V ENV 14232	(05.02)	Hochleistungskeramik – Begriffe, Definitionen und Abkürzungen

- DIN EN ISO 13565-1 (04.98) Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastenschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 1: Filterung und allgemeine Messbedingungen
- DIN EN ISO 13565-2 (04.98) Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastenschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve
- DIN EN ISO 13565-3 (08.00) Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastenschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 3: Beschreibung der Höhe von Oberflächen mit der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve
- DIN EN 60672-1 (05.96) Keramik- und Glasisolierstoffe – Teil 1: Begriffe und Gruppeneinteilung  
identisch mit IEC 60672-1
- DIN EN 60672-2 (10.00) Keramik- und Glasisolierstoffe – Teil 2: Prüfverfahren  
identisch mit IEC 60672-2
- DIN EN 60672-3 (02.99) Keramik- und Glasisolierstoffe – Teil: Anforderungen für einzelne Werkstoffe  
identisch mit IEC 60672-3
- DIN ISO 1101 (08.95) Technische Zeichnungen; Form- und Lagetolerierung; Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen; Allgemeines, Definitionen, Symbole, Zeichnungseintragungen
- DIN ISO 2768-1 (06.91) Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung
- DIN ISO 2768-2 (04.91) Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Form und Lage ohne einzelne Toleranzeintragung
- DIN ISO 286-1 (11.90) ISO-System für Grenzmaße und Passungen; Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen

## Anhang

---

DIN ISO 286-2	(11.90)	ISO-System für Grenzmaße und Passungen; Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen
DIN EN ISO 1302	(06.02)	Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation
ISO 9000	(05.90)	Qualitätsmanagement und Qualitätssicherungsnormen; Leitfaden zur Auswahl und Anwendung
ISO 15165	(10.01)	Hochleistungskeramik; Klassifizierungssystem
DVS 3102	(02.93)	Herstellen von Keramik-Keramik- und Keramik-Metall-Verbindungen durch Aktivlötten
VDI/VDE 2603	(09.90)	Oberflächen-Messverfahren; Messung des Flächentraganteils
VDI/VDE 2604	(06.71)	Oberflächen-Messverfahren; Rauheitsuntersuchung mittels Interferenzmikroskopie

### 10.7.2 Prüfverfahren für Pulver

DIN EN 725-1	(06.97)	Bestimmung von Verunreinigungen in Aluminiumoxidpulver
DIN EN 725-2	(03.94)	Bestimmung des Gehalts von Verunreinigungen in Bariumtitanat
DIN EN 725-3	(06.97)	Bestimmung des Sauerstoffgehalts in Nichtoxidpulvern mittels Trägergasheißextraktion
DIN EN 725-5	(03.96)	Bestimmung der Teilchengrößenverteilung
DIN EN 725-6	(06.97)	Bestimmung der spezifischen Oberfläche
DIN EN 725-7	(01.96)	Bestimmung der absoluten Dichte
DIN EN 725-8	(05.97)	Bestimmung der Klopfichte
DIN EN 725-9	(05.97)	Bestimmung der Schüttdichte

DIN EN 725-10	(04.97)	Bestimmung der Verdichtungseigenschaften
DIN V ENV 725-11	(11.93)	Bestimmung des Verdichtungsverhaltens bei natürlichem Sinterbrand
DIN EN 725-12	(06.01)	Chemische Analyse von Zirkoniumoxid
DIN V ENV 14226	(07.02)	Bestimmung von Calcium, Magnesium, Eisen und Aluminium in Siliciumnitrid mittels Flammen-Atomabsorptionsspektroskopie (FAAS) oder Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-AES)
DIN V ENV 14273	(09.02)	Bestimmung der kristallinen Phase in Zirkoniumoxid
DIN 51079-1	(04.91)	Chemische Analyse von Siliciumcarbid als Rohstoff und als Bestandteil von Werkstoffen; Soda-Borsäure-Aufschluss
DIN 51079-2	(03.98)	Chemische Analyse von Siliciumcarbid als Rohstoff und als Bestandteil von Werkstoffen; Säure-Druck-Aufschluss
DIN V 51079-3	(03.98)	Chemische Analyse von Siliciumcarbid als Rohstoff und als Bestandteil von Werkstoffen; Aufschluss des freien Kohlenstoffs durch nasschemische Oxidation
Pr DIN 51082	(06.01)	Bestimmung des pH-Werts von Suspensionen nichtwasserlöslicher Pulver
ISO 14703	(03.00)	Probenvorbereitung zur Bestimmung der Teilchengrößenverteilung von keramischen Pulvern

### 10.7.3 Prüfverfahren für monolithische Keramik

DIN EN 623-1	(04.95)	Allgemeine und strukturelle Eigenschaften; Prüfung auf Anwesenheit von Oberflächenfehlern durch Farbstoffeindringtests
DIN EN 623-2	(11.93)	Allgemeine und strukturelle Eigenschaften; Bestimmung von Dichte und Porosität
DIN EN 623-3	(04.93)	Allgemeine und strukturelle Eigenschaften; Bestimmung der Korngröße
DIN EN 623-4	(11.93)	Allgemeine und strukturelle Eigenschaften; Bestimmung der Oberflächenrauheit
DIN EN 623-5	(10.02)	Allgemeine und strukturelle Eigenschaften; Bestimmung des Volumenanteils von Phasen durch Auswertung von Mikrogefügeaufnahmen
DIN V ENV 820-1	(02.94)	Thermomechanische Eigenschaften; Bestimmung der Biegefestigkeit bei erhöhten Temperaturen
DIN EN 820-2	(11.92)	Thermomechanische Eigenschaften; Bestimmung der Verformung unter Eigengewicht
DIN V ENV 820-3	(02.94)	Thermomechanische Eigenschaften; Bestimmung der Thermoschockbeständigkeit mit dem Wasserabschreckversuch
DIN V ENV 820-4	(12.01)	Thermomechanische Eigenschaften; Bestimmung der Kriechverformung unter Biegebeanspruchung bei erhöhten Temperaturen
DIN EN 821-1	(04.95)	Thermophysikalische Eigenschaften; Bestimmung der thermischen Längenänderung
DIN EN 821-2	(08.97)	Thermophysikalische Eigenschaften; Messung der Temperaturleitfähigkeit mit dem Laserflash- (oder Wärmeimpuls-) Verfahren
DIN V ENV 821-3	(11.93)	Thermophysikalische Eigenschaften; Bestimmung der spezifischen Wärme

DIN EN 843-1	(04.95)	Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur; Bestimmung der Biegefestigkeit
DIN V ENV 843-2	(02.96)	Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur; Bestimmung des E-Moduls
DIN V ENV 843-3	(11.96)	Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur; Bestimmung der Parameter des unterkritischen Risswachstums aus Biegefestigkeitsprüfungen mit konstanter Spannungsrate
DIN V ENV 843-4	(10.94)	Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur; Härteprüfung nach Vickers, Knoop und Rockwell
DIN V ENV 843-5	(01.97)	Mechanische Prüfung bei Raumtemperatur; statistische Auswertung
DIN V ENV 1006	(04.93)	Richtlinien zur Probenahme und Entnahme von Proben
DIN V ENV 12923-1	(02.98)	Monolithische Keramik; Allgemeines zur Durchführung von Korrosionsprüfungen
DIN V ENV 12923-2	(05.02)	Monolithische Keramik; Oxidationsprüfung
DIN EN 50324-1	(12.02)	Piezoelektrische Eigenschaften von keramischen Werkstoffen und Komponenten; Begriffe
DIN EN 50324-2	(12.02)	Piezoelektrische Eigenschaften von keramischen Werkstoffen und Komponenten; Messverfahren – Kleinsignal
DIN EN 50324-3	(04.01)	Piezoelektrische Eigenschaften von keramischen Werkstoffen und Komponenten; Messverfahren – Großsignal
DIN prEN 50359-1-1	(07.01)	Hochleistungskeramik; elektrische Eigenschaften; Verfahren zur Prüfung der Durchschlagfestigkeit, Kurzzeitverhalten
DIN prEN 50359-1-2	(07.01)	Hochleistungskeramik; elektrische Eigenschaften; Verfahren zur Bestimmung des spezifischen Oberflächen- und Durchgangswiderstands im Temperaturbereich 20 °C bis 800 °C

## Anhang

---

DIN 51069-2	(11.72)	Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe; vergleichende Prüfung des Verhaltens feuerfester Werkstoffe gegen den Angriff fester und flüssiger Stoffe bei hoher Temperatur, Tiegelverfahren
DIN 51110-3	(09.93)	Prüfung von keramischen Hochleistungswerkstoffen; 4-Punkt-Biegeversuch; statistische Auswertung; Ermittlung der Weibull-Parameter
DIN IEC 60483	(04.88)	Leitfaden zur Bestimmung der dynamischen Eigenschaften von piezoelektrischer Keramik mit hohem elektromechanischen Koppelfaktor
DIN IEC 60642	(04.88)	Piezoelektrische Vibratoren und Resonatoren für Frequenzstabilisierung und -selektion; Normwerte und Bedingungen; Mess- und Prüfverfahren
DIN 51045-2	(10.76)	Bestimmung der Längenänderung fester Körper unter Wärmeeinwirkung; Prüfung gebrannter feinkeramischer Werkstoffe
DIN 51045-3	(10.76)	Bestimmung der Längenänderung fester Körper unter Wärmeeinwirkung; Prüfung ungebrannter feinkeramischer Werkstoffe
ISO 14704	(08.00)	Bestimmung der Biegefestigkeit von monolithischer Keramik bei Raumtemperatur
ISO 14705	(03.00)	Test method for hardness of monolithic ceramics at room temperature
ISO 15490	(07.00)	Prüfverfahren zur Bestimmung der Zugfestigkeit von monolithischer Keramik bei Raumtemperatur
prISO/DIS 15732	(06.99)	Prüfverfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit von monolithischer Keramik bei Raumtemperatur an einseitig gekerbten Biegeproben (SEPB-Verfahren)
ISO 17532	(10.01)	Prüfverfahren zur Bestimmung der linearen Wärmedehnung von monolithischer Keramik bei Raumtemperatur mittels Schubtangentechnik

prISO 17565	(10.01)	Prüfverfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von monolithischer Keramik erhöhten Temperaturen
prISO/DIS 18756	(05.02)	Determination of fracture toughness of monolithic ceramics at room temperature by the surface-crack-in-flexure-method (SCF)
prISO/DIS 20509	(05.02)	Determination of oxidation resistance of non-oxide monolithic ceramics
ASTM C 768	(1999)	Bestimmung der Beständigkeit von feuerfesten Steinen gegen schmelzflüssige Schlacke
ASTM C 874	(1999)	Prüfung der Verschlackungsbeständigkeit von feuerfesten Stoffen

#### 10.7.4 Prüfverfahren für Verbundwerkstoffe

DIN EN 658-1	(01.99)	Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei Raumtemperatur – Teil 1: Bestimmung der Eigenschaften unter Zug
DIN V ENV 658-2	(05.93)	Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei Raumtemperatur – Teil 2: Bestimmung der Druckfestigkeit
DIN V ENV 658-3	(02.93)	Eigenschaften von keramischen Verbundstoffen bei Raumtemperatur – Teil 3: Bestimmung der Biegefestigkeit
DIN V ENV 658-4	(02.93)	Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei Raumtemperatur – Teil 4: Bestimmung der Scherfestigkeit unter Druckbelastung von gekerbten Proben
DIN V ENV 658-5	(02.93)	Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei Raumtemperatur – Teil 5: Bestimmung der Scherfestigkeit im 3-Punkt-Biegeversuch mit kurzem Auflagerabstand

## Anhang

---

DIN V ENV 658-6	(02.93)	Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei Raumtemperatur – Teil 6: Bestimmung der Scherfestigkeit im Doppelscherdurchstoßversuch
DIN V ENV 1007-1	(04.93)	Keramikfasern für keramische Verbundwerkstoffe – Teil 1: Bestimmung des Schlichtegehaltes;
DIN V ENV 1007-2	(04.93)	Keramikfasern für keramische Verbundwerkstoffe – Teil 2: Bestimmung der Feinheit
DIN V ENV 1007-3	(11.93)	Verfahren zur Prüfung der Faserverstärkungen – Teil 3: Bestimmung des Faserdurchmessers
DIN V ENV 1007-4	(05.94)	Verfahren zur Prüfung der Faserverstärkungen – Teil 4: Bestimmung der Zugeigenschaften von Fasern bei Raumtemperatur
DIN EN 1007-5	(05.02)	Verfahren zur Prüfung der Faserverstärkungen – Teil 5: Bestimmung der Verteilung von Zugfestigkeit und Zugdehnung von Fasern im Faserbündel bei Raumtemperatur
DIN V ENV 1159-1	(11.93)	Thermophysikalische Eigenschaften; Bestimmung der thermischen Ausdehnung
DIN V ENV 1159-2	(11.93)	Thermophysikalische Eigenschaften; Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit
DIN V ENV 1159-3	(11.93)	Thermophysikalische Eigenschaften; Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität
DIN V ENV 1389	(06.94)	Physikalische Eigenschaften; Bestimmung der Dichte und Porosität
DIN V ENV 1892	(07.96)	Mechanische Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei hoher Temperatur in inerter Atmosphäre; Bestimmung der Eigenschaften unter Zug
DIN V ENV 1893	(07.96)	Mechanische Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei hoher Temperatur in Luft bei Atmosphärendruck; Bestimmung der Eigenschaften unter Zug

- DIN V ENV 1894 (07.96) Mechanische Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei hoher Temperatur in inerter Atmosphäre; Bestimmung der Scherfestigkeit durch Druckbeanspruchung von gekerbten Proben
- DIN V ENV 12289 (10.96) Mechanische Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei Raumtemperatur; Bestimmung der Schereigenschaften in der Ebene
- DIN V ENV 12290 (10.96) Mechanische Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei hoher Temperatur in inerter Atmosphäre; Bestimmung der Eigenschaften unter Druck
- DIN V ENV 12291 (10.96) Mechanische Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei hoher Temperatur an Luft bei Atmosphärendruck; Bestimmung der Eigenschaften unter Druck

### 10.7.5 Prüfverfahren für Schichten

- DIN EN 1071-2 (12.02) Verfahren zur Prüfung keramischer Schichten; Bestimmung der Schichtdicke mit dem Kalottenschleifverfahren
- DIN V ENV 1071-3 (06.94) Verfahren zur Prüfung keramischer Schichten; Bestimmung der Haftung mit dem Ritztest
- DIN V ENV 1071-4 (06.95) Verfahren zur Prüfung keramischer Schichten; Bestimmung der chemischen Zusammensetzung
- DIN V ENV 1071-5 (04.95) Verfahren zur Prüfung keramischer Schichten; Bestimmung der Porosität
- DIN V ENV 1071-6 (09.02) Verfahren zur Prüfung keramischer Schichten; Bestimmung des Abriebwiderstands von Schichten durch eine Mikroabriebprüfung
- DIN EN 1071-12 (12.02) Verfahren zur Prüfung keramischer Schichten; Bestimmung der Schichtdicke mit einem Kontaktprofilometer

## Anhang

---

- DVS 2301 (06.01) Thermische Spritzverfahren für metallische und nichtmetallische Werkstoffe
- DVS 2307-4 (01.97) Arbeitsschutz beim Plasmaspritzen

### 10.7.6 Normen zu Anwendungen

- DIN 43724 (02.79) Messen, Steuern, Regeln; elektrische Thermometer, keramische Schutzrohre und Halteringe für Thermoelemente
- DIN 48108-1 (08.83) Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik; Fassungsstellen für Isolierkörper; Riffelung
- DIN 48108-2 (08.83) Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik; Fassungsstellen für Isolierkörper; Splitterung
- DIN 48108-3 (08.83) Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik; Fassungsstellen für Isolierkörper; Wellenprofil
- DIN 58835-1 (07.79) Chirurgische Implantate; Keramische Werkstoffe, Aluminiumoxid
- DIN VDE 0466-2 (03.71) Bestimmungen für Isolatoren für Freileitungen, Fahrleitungen und Fernmeldeleitungen; Teil 2: Bestimmungen für Isolatoren für Starkstrom-Freileitungen und Fahrleitungen bei 1.000 V sowie Fernmelde-Freileitungen
- VDI/VDE 3717 Blatt (07.93) Technische Liefervorschriften; Aluminiumoxid-substrate für Dickschichtschaltungen

### 10.7.7 Weitere zitierte Normen

- DIN 8589 (09.03) Fertigungsverfahren Spanen (13 Teile)
- DIN 8505-1 (05.79) Löten; Allgemeines, Begriffe
- DIN 8505-2 (05.79) Löten; Einteilung der Verfahren, Begriffe

DIN 8505-3	(01-83)	Löten; Einteilung der Verfahren nach Energieträgern, Verfahrensbeschreibungen
DIN 50900-2	(06.02)	Korrosion der Metalle – Begriffe – Teil 2: elektrochemische Begriffe
DIN 50323-1	(1988)	Tribologie; Begriffe <b>Nicht mehr im Programm des Beuth-Verlags!</b>
DIN 50323-3	(1993)	Tribologie; Reibung; Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen <b>Nicht mehr im Programm des Beuth-Verlags!</b>
DIN 50320	(1979)	Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebiets <b>Nicht mehr im Programm des Beuth-Verlags!</b>
DIN 50321	(1979)	Verschleißmessgrößen <b>Nicht mehr im Programm des Beuth-Verlags!</b>

## 10.8 Umrechnung in andere Maßsysteme

Größe	Umrechnungsfaktor	
Länge	1m	= 100 cm = $10^{10}$ Å = 39,75 inch = 3,281 feet = 1,0936 yards = $0,6214 \cdot 10^{-3}$ miles
Fläche	1m <sup>2</sup>	= 1.550 sq inch = 10,764 sq feet = 1.196 sq yards
Volumen	1m <sup>3</sup>	= 1.000 l = 61.023 cu inch = 35,314 cu feet = 2.114 US pints = 1.760 UK pints = 264,2 US gallons = 8,386 US barrels = 6,11 UK barrels = 28,37 US bushels = 27,51 UK bushels = 4,13 US quarters = 3,44 UK quarters = 0,3532 reg tons
Masse	1 kg	= 1.000 g = 15.432 grains (gr) = 35,273 ounces = 2,2046 pounds (lbs) = $1,102 \cdot 10^{-3}$ US short tons = $0,9842 \cdot 10^{-3}$ UK tons (US long tons) = 0,0220 US cwt = 0,197 UK cwt
Dichte	1 kg/m <sup>3</sup>	= 0,001 g/cm <sup>3</sup> = 0,10197 kp s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> = 0,6242 lbs/cu ft. = 0,01002 lbs/UK gallon = 0,08344 lbs/US gallon = 436,994 gr/cu ft
Kraft	1N	= 1 kg m/s <sup>2</sup> = $10^5$ g cm/s <sup>2</sup> (dyn) = 0,10197 kp = 7,233 poundal (pdl) = 0,2248 pound-weight (lb wt, lbf)
Druck	1 Pa (N/m <sup>2</sup> )	= 1 kg/m s <sup>2</sup> = $10^{-5}$ bar = 0,10197 kp/m <sup>2</sup> (mm WS) = 10 g/cm s <sup>2</sup> (dyn/cm <sup>2</sup> ) = $0,10197 \cdot 10^{-4}$ at (techn.) = $0,09694 \cdot 10^{-4}$ atm (phys.) = $750,1 \cdot 10^{-5}$ Torr (mm QS) = $1,4504 \cdot 10^{-4}$ lbf/sq inch (psi)
	1 at	= 10.000 kp/m <sup>2</sup> (mm WS) = 735,6 Torr = 14,22 lbf/sq inch = 28,96 inch Hg

Größe	Umrechnungsfaktor	
Arbeit, Energie	1 J	= 1 Nm = 1 Ws = 1 kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = 10 <sup>7</sup> g cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> (erg) = 0,10197 kp m = 2,3844 · 10 <sup>-4</sup> kcal = 0,27778 · 10 <sup>-6</sup> kWh = 9,4782 · 10 <sup>-4</sup> BTU = 0,37767 · 10 <sup>-6</sup> PSh = 34,12 · 10 <sup>-12</sup> t SKE (Steinkohleneinheiten)
	1 kcal	= 4.186,8 J = 426,94 kpm = 3,968 BTU
	1 kWh	= 859,85 kcal = 1,3596 PSh = 3.411 BTU
	1 SKE	= 29,3 MJ = 7.000 kcal
Leistung	1 W	= 1 J/s = Nm/s = 1 kg m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> = 10 <sup>7</sup> erg/s = 0,10197 kp m/s = 1,3596 · 10 <sup>-3</sup> PS = 1,3775 · 10 <sup>-3</sup> HP
	1 PS	= 735,5 W = 75 kp m/s = 632,3 kcal/h = 0,987 HP
Dynamische Viskosität	1 Ns/m <sup>2</sup>	= 1 Pa s = 1 kg/m s = 10 g/cm s (Poise) = 0,10197 kp s/m <sup>2</sup> = 0,6721 lbs/ft. s = 0,020885 lbf/sq. ft
	1 m Pa s	= 1 cP (Centipoise)
Kinematische Viskosität	1 m <sup>2</sup> /s	= 10 <sup>4</sup> cm <sup>2</sup> /s (Stokes) = 10,764 sq. ft/s
Heizwert, Umwandlungswärme	1 J/kg	= 1 Ws/kg = 1m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = 2,3884 · 10 <sup>-4</sup> kcal/kg = 4,30 · 10 <sup>-4</sup> BTU/lb
Spezifische Wärme	1 J/kgK	= 1 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> K = 2,3884 · 10 <sup>-4</sup> kcal/kg grd = 2,3884 · 10 <sup>-4</sup> BTU lb. °F
Wärmeleitfähigkeit	1 W/mK	= 1 kg m/s <sup>3</sup> K = 0,859824 kcal/m h grd = 6,934 BTU inch/sq. ft. hr. °F
Wärmeübergangszahl Wärmedurchgangszahl	1 W/m <sup>2</sup> K	= 1 kg/s <sup>3</sup> K = 0,859824 kcal/m <sup>2</sup> h K = 0,1754 BTU/sq ft hr °F
	Temperatur	X [K] = 273,15 + X [°C] X [°F] = 32 + 1,8 X [°C]

**Tabelle 35:** Umrechnung in andere Maßsysteme

### 10.9 Eigenschaftstabellen

Die in den folgenden Tabellen enthaltenen Werkstoffe werden in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen eingesetzt. Deshalb sind nicht immer alle Kennwerte angegeben. Prinzipiell kann in **elektrische** und **mechanische** Anwendungen unterschieden werden. Die mit einer Kennzeichnung nach **DIN EN 60 672-1** versehenen Werkstoffe sind für die **Elektrotechnik** genormt, werden jedoch nicht nur dort eingesetzt. Biegefestigkeiten für Werkstoffe der Technischen Keramik werden nach DIN EN 60 672-2 (siehe S. 263 ff.) ermittelt.

#### 10.9.1. Werkstoffe nach DIN EN 60 672-3

10.9.1.1.	Alkali-Aluminiumsilikate (C 100)	Tabelle 36
10.9.1.2.	Magnesiumsilikate (C 200)	Tabelle 37
10.9.1.3.	Titanate (C 300)	Tabelle 38
10.9.1.4.	Erdalkali-Aluminiumsilikate (C 400)	Tabelle 39
10.10.1.5.	Aluminium- und Magnesiumsilikate (C 500)	Tabelle 40
10.10.1.6.	Mullit (C 600) und Aluminiumoxid (C 700)	Tabelle 41
10.10.1.7.	Andere Oxidkeramiken (C 800) und Nichtoxide (C 900) für Isolierzwecke	Tabelle 42

#### 10.9.2. Nicht genormte Hochleistungswerkstoffe

10.9.2.1.	Oxidkeramiken ( $Al_2O_3$ , PSZ, $SiO_2$ )	Tabelle 43
10.9.2.2.	Carbide (SiC, BC)	Tabelle 44
10.9.2.3.	Nitride (SN, ALN)	Tabelle 45
10.9.2.4.	Weitere Werkstoffe (ATI, MGO)	Tabelle 46

Die in den Tabellen angegebenen Werte sind in der Regel Mindestwerte aufgrund von verschiedensten Herstellerangaben. Die tatsächlichen Werte sind vielfach deutlich besser! Es empfiehlt sich deshalb, verbindliche Werte bei den Herstellern zu erfragen.

#### **Achtung:**

**Die Werte der Biegebruchfestigkeit  $\sigma_B$ , ermittelt durch 3-Punkt-Biegeversuch, liegen etwa 30 % über denen der 4- Punktbiegung!**

## 10.9.1 Werkstoffe nach DIN EN 60 672-3

### 10.9.1.1 Alkali-Aluminiumsilikate (C 100)

Bezeichnung nach DIN EN 60 672			C 110	C 111	C 112	C 120	C 130	C 140
			Quarz- porzellane plast. Formgeb.	Quarz- porzellane gepresst	Cristobalit- porzellane	Tonerde- porzellan	Tonerde- porzellan hochfest	Lithium- porzellan
<u>mechanisch:</u>	Symbol	Einheit						
Offene Porosität		[Vol %]	0,0	< 3,0	0,0	0,0	0,0	0,5
Dichte, min.	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,2	2,2	2,3	2,4	2,6	2,0
3-Pkt.-Biegefestigkeit, unglasiert	$\sigma_{ft}$	[MPa]	50	40	80	90	140	50
3-Pkt.-Biegefestigkeit, glasiert	$\sigma_{fg}$	[MPa]	60	--	100	110	160	60
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	60	--	70	--	100	--
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	--	--	--	--	--	--
Spannungs- intensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa √m]	--	--	--	--	--	--

#### elektrisch:

Durchschlags- festigkeit	E <sub>d</sub>	[kV/mm]	20	--	20	20	20	15
Stehspannung, min.	U	[kV]	30	--	30	30	30	20
Permittivitätszahl 48-62 Hz	$\epsilon_r$	[--]	6 - 7	--	5 - 6	6 - 7	6 - 7,5	5 - 7
Verlustfaktor bei 20 °C, 48-62 Hz	$\tan \delta_{pf}$	[10 <sup>-3</sup> ]	25	--	25	25	30	10
Verlustfaktor bei 20 °C, 1 MHz	$\tan \delta_{1M}$	[10 <sup>-3</sup> ]	12	--	12	12	15	10
Spezifischer Widerstand b. 20 °C	$\rho_{V>20}$	[Ωm]	10 <sup>11</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup>
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	$\rho_{V>600}$	[Ωm]	10 <sup>2</sup>					

#### thermisch:

Mittlerer Längen- ausdehnungskoeff- fizient bei 30-600 °C	$\alpha_{30-600}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	4 - 7	4 - 7	6 - 8	4 - 7	5 - 7	1 - 3
Spezifische Wärmekapazität bei 30-600 °C	C <sub>p,30-600</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	750 - 900	800 - 900	800 - 900	750 - 900	800 - 900	750 - 900
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{30-100}$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1 - 2,5	1,0 - 2,5	1,4 - 2,5	1,2 - 2,6	1,5 - 4,0	1,0 - 2,5
Temperaturwech- selbeständigkeit		bewertet	gut	gut	gut	gut	gut	gut
Max. Einsatz- temperatur	T	[°C]	--	--	--	--	--	--

**Tabelle 36:** Kennwerte für Alkali-Aluminiumsilikate (C 100)

## Anhang

### 10.9.1.2 Magnesiumsilikate (C 200)

Bezeichnung nach DIN EN 60 672			C 210	C 220	C 221	C 230	C 240	C 250
<b>mechanisch:</b>	Symbol	Einheit	Steatit für	Steatit	Steatit	Steatit	Forsterite	Forsterite
			Nieder- spannung	normal	kleiner Verlustfak.	porös	porös	dicht
Offene Porosität		[Vol %]	0,5	0,0	0,0	35,0	30,0	0,0
Dichte, min.	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,3	2,6	2,7	1,8	1,9	2,8
3-Pkt.-Biegefestigkeit	$\sigma_B$	[MPa]	80	120	140	30	35	140
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	60	80	110	--	--	--
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	--	--	--	--	--	--
Spannungs- intensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa √m]	--	--	--	--	--	--

#### elektrisch:

Durchschlags- festigkeit	E <sub>d</sub>	[kV/mm]	--	15	20	--	--	20
Stehspannung, min.	U	[kV]	--	20	30	--	--	20
Permittivitätszahl 48-62 Hz	$\epsilon_r$	[--]	6	6	6	--	--	7
Verlustfaktor bei 20 °C, 48-62 Hz	$\tan \delta_{pf}$	[10 <sup>-3</sup> ]	25	5	1,5	--	--	1,5
Verlustfaktor bei 20 °C, 1 MHz	$\tan \delta_{1M}$	[10 <sup>-3</sup> ]	7	3	1,2	--	--	0,5
Spezifischer Widerstand b. 20 °C	$\rho_{V>20}$	[Ωm]	10 <sup>10</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup>	--	--	10 <sup>11</sup>
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	$\rho_{V>600}$	[Ωm]	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>

#### thermisch:

Mittlerer Längen- ausdehnungskoeff- fizient bei 30-600 °C	$\alpha_{30-600}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	6 - 8	7 - 9	7 - 9	8 - 10	8 - 10	9 - 11
Spezifische Wärmekapazität bei 30-600 °C	C <sub>p,30-600</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	800 - 900	800 - 900	800 - 900	800 - 900	800 - 900	800 - 900
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{30-100}$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1 - 2,5	2 - 3	2 - 3	1,5 - 2	1,4 - 2	3 - 4
Temperaturwech- selbeständigkeit		bewertet	gut	gut	gut	gut	gut	gut
Max. Einsatz- temperatur	T	[°C]	1.000*)	1.200	1.200	1.000*)	1.000*)	1.200

\*) Je nach Härte, die von der Glühtemperatur abhängt

**Tabelle 37: Kennwerte für Magnesiumsilikate (C 200)**

### 10.9.1.3 Titanate (C 300)

Bezeichnung nach DIN EN 60 672			C 310	C 320	C 330	C 331	C 340	C 350
<b>mechanisch:</b>	Symbol	Einheit	Titandioxid	Magnesiumtitanate	Titandioxid	Titandioxid	Wismuttitanat	Perowskite
			Hauptbestandteil		mit anderen	mit anderen	Basis	mittleres $\epsilon_r$
Offene Porosität		[Vol %]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dichte, min.	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	3,5	3,1	4,0	4,5	3,0	4,0
3-Pkt.-Biegefestigkeit	$\sigma_B$	[MPa]	70	70	80	80	70	50
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	--	--	--	--	--	--
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	--	--	--	--	--	--
Spannungsintensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa √m]	--	--	--	--	--	--

#### elektrisch:

Durchschlagsfestigkeit	E <sub>d</sub>	[kV/mm]	8	8	10	10	6	2
Stehspannung, min.	U	[kV]	15	15	15	15	8	2
Permittivitätszahl 48-62 Hz	$\epsilon_r$	[--]	40 - 100	12 - 40	25 - 50	30 - 70	100 - 700	350 - 3.000
Verlustfaktor bei 20 °C, 48-62 Hz	$\tan \delta_{1k}$	[10 <sup>-3</sup> ]	6,5	2	20,0	7	--	--
Verlustfaktor bei 20 °C, 1 MHz	$\tan \delta_{1M}$	[10 <sup>-3</sup> ]	2	1,5	0,8	1	5	35,0
Spezifischer Widerstand b. 20 °C	$\rho_{V>20}$	[Ωm]	10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	$\rho_{V>600}$	[Ωm]	--	--	--	--	--	--

#### thermisch:

Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient bei 30-600 °C	$\alpha_{30-600}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	6 - 8	6 - 10	--	--	--	--
Spezifische Wärmekapazität bei 30-600 °C	C <sub>p,30-100</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	700 - 800	900 - 1.000	--	--	--	--
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{30-100}$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	3 - 4	3,5 - 4	--	--	--	--
Temperaturwechselbeständigkeit		bewertet	--	--	--	--	--	--
Max. Einsatztemperatur	T	[°C]	--	--	--	--	--	--

Tabelle 38: Kennwerte für Titanate u. a. (C 300)

## Anhang

### 10.9.1.4 Erdalkali-Aluminiumsilikate (C 400)

Bezeichnung nach DIN EN 6 0672			C 410	C 420	C 430	C 440
			Cordierite	Celsiane	Kalzium-basis	Zirkon-basis
<u>mechanisch:</u>	Symbol	Einheit	dicht	dicht	dicht	dicht
Offene Porosität		[Vol %]	0,5	0,5	0,5	0,5
Dichte, min.	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,1	2,7	2,3	2,5
3-Pkt.-Biegefestigkeit	$\sigma_B$	[MPa]	60	80	80	100
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	--	--	80	130
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	--	--	--	--
Spannungsintensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa √m]	--	--	--	--

#### elektrisch:

Durchschlagsfestigkeit	E <sub>d</sub>	[kV/mm]	10	20	15	15
Stehspannung, min.	U	[kV]	15	30	20	20
Permittivitätszahl 48-62 Hz	$\epsilon_r$	[--]	5	7	6 - 7	8 - 12
Verlustfaktor bei 20 °C, 48-62 Hz	$\tan \delta_{pf}$	[10 <sup>-3</sup> ]	25	10	5	5
Verlustfaktor bei 20 °C, 1 MHz	$\tan \delta_{1M}$	[10 <sup>-3</sup> ]	7	0,5	5,0	5
Spezifischer Widerstand b. 20 °C	$\rho_{V>20}$	[Ωm]	10 <sup>10</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup>
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	$\rho_{V>600}$	[Ωm]	10 <sup>3</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>

#### thermisch:

Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient bei 30-600 °C	$\alpha_{30-600}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	2 - 4	3,5 - 6	--	--
Spezifische Wärmekapazität bei 30-600 °C	C <sub>p,30-600</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	800 - 1.200	800 - 1.000	700 - 850	550 - 650
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{30-100}$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1,2 - 2,5	1,5 - 2,5	1 - 2,5	5 - 8
Temperaturwechselbeständigkeit		bewertet	sehr gut	gut	gut	gut
Max. Einsatztemperatur	T	[°C]	1.200	--	--	--

**Tabelle 39:** Kennwerte für Erdalkali-Aluminiumsilikate (C 400)

### 10.9.1.5 Aluminium- und Magnesiumsilikate (C 500)

Bezeichnung nach DIN EN 60 672			C 510	C 511	C 512	C 520	C 530
			Aluminiumsilikatbasis	Magnesium-Aluminium-Silikatbasis	Magnesium-Aluminium-Silikatbasis	Cordieritbasis	Aluminiumsilikatbasis
<b>mechanisch:</b>	Symbol	Einheit					
Offene Porosität		[Vol %]	30	20	40	20	30
Dichte, min.	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,9	1,9	1,8	1,9	2,1
3-Pkt.-Biegefestigkeit	$\sigma_B$	[MPa]	25	25	15	30	30
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	--	--	--	40	--
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	--	--	--	--	--
Spannungsintensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa √m]	--	--	--	--	--

#### elektrisch:

Durchschlagsfestigkeit	E <sub>d</sub>	[kV/mm]	--	--	--	--	--
Stehspannung, min.	U	[kV]	--	--	--	--	--
Permittivitätszahl 48-62 Hz	$\epsilon_r$	[--]	--	--	--	--	--
Verlustfaktor bei 20 °C, 48-62 Hz	$\tan \delta_{pf}$	[10 <sup>-3</sup> ]	--	--	--	--	--
Verlustfaktor bei 20 °C, 1 MHz	$\tan \delta_{1M}$	[10 <sup>-3</sup> ]	--	--	--	--	--
Spezifischer Widerstand b. 20 °C	$\rho_{V>20}$	[Ωm]	--	--	--	--	--
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	$\rho_{V>600}$	[Ωm]	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>

#### thermisch:

Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient bei 30-600 °C	$\alpha_{30-600}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	3 - 6	4 - 6	3 - 6	2 - 4	4 - 6
Spezifische Wärmekapazität bei 30-600 °C	C <sub>p,30-600</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	750 - 850	750 - 850	750 - 900	750 - 900	800 - 900
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{30-100}$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1,2 - 1,7	1,3 - 1,8	1 - 1,5	1,3 - 1,8	1,4 - 2,0
Temperaturwechselbeständigkeit		bewertet	sehr gut				
Max. Einsatztemperatur	T	[°C]	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200

**Tabelle 40:** Kennwerte für poröse Aluminiumsilikate und Magnesiumsilikate (C 500)

## Anhang

### 10.9.1.6 Mullit (C 600) und Aluminiumoxid (C 700)

Bezeichnung nach DIN EN 60 672			C 610	C 620	C 780	C 786	C 795	C 799
<b>mechanisch:</b>	Symbol	Einheit	Mullit-keramik	Mullit-keramik	Aluminium-oxid	Aluminium-oxid	Aluminium-oxid	Aluminium-oxid
			50-65 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	65-80 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80-86 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	86-95 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	95-99 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	> 99 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Offene Porosität		[Vol %]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dichte, min.	ρ	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,6	2,8	3,2	3,4	3,5	3,7
4-Pkt.-Biegefestigkeit	σ <sub>B</sub>	[MPa]	120 <sup>*)</sup>	150 <sup>*)</sup>	200	250	280	300
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	100	150	200	220	280	300
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	--	--	--	--	--	--
Spannungsintensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa √m]	--	--	--	--	--	--

#### **elektrisch:**

Durchschlagsfestigkeit	E <sub>d</sub>	[kV/mm]	17	15	10	15	15	17
Stehspannung, min.	U	[kV]	25	20	15	18	18	20
Permittivitätszahl 48-62 Hz	ε <sub>r</sub>	[--]	8	8	8	9	9	9
Verlustfaktor bei 20 °C, 48-62 Hz	tan δ <sub>pf</sub>	[10 <sup>-3</sup> ]	--	--	1,0	0,5	0,5	0,2
Verlustfaktor bei 20 °C, 1 MHz	tan δ <sub>1M</sub>	[10 <sup>-3</sup> ]	--	--	1,5	1	1	1
Spezifischer Widerstand b. 20 °C	ρ <sub>V&gt;20</sub>	[Ωm]	10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>12</sup>
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	ρ <sub>V&gt;600</sub>	[Ωm]	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>

#### **thermisch:**

Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient bei 30-600 °C	α <sub>30-600</sub>	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	5 - 7	5 - 7	6 - 8	6 - 8	6 - 8	7 - 8
Spezifische Wärmekapazität bei 30-600 °C	C <sub>p,30-600</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	850 - 1.050	850 - 1.050	850 - 1.050	850 - 1.050	850 - 1.050	850 - 1.050
Wärmeleitfähigkeit	λ <sub>30-100</sub>	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	2 - 6	6 - 15	10 - 16	14 - 24	16 - 28	19 - 30
Temperaturwechselbeständigkeit		bewertet	gut	gut	gut	gut	gut	gut
Max. Einsatztemperatur	T	[°C]	1.200	1.200	1.200 - 1.400	1.400	1.400 - 1.500	1.400 - 1.700

<sup>\*)</sup> 3-Pkt Biegefestigkeitswerte

**Tabelle 41:** Kennwerte für Mullit (C 600) und Aluminiumoxid (C 700)

### 10.9.1.7 Andere Oxide (C 800) und Nichtoxide (C 900)

Bezeichnung nach DIN EN 60 672			C 810	C 820	C 910	C 920	C 930	C 935
			Beryllium-oxid	Magnesium-oxid	Aluminium-nitrid	Bornitrid	Silicium-nitrid	Silicium-nitrid
<b>mechanisch:</b>	<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	dicht	porös			reaktionsgebunden	dicht
Offene Porosität		[Vol %]	0,0	30	0,0	2,0	40	0,0
Dichte, min.	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,8	2,5	3,0	2,5	1,9	3,0
4-Pkt.-Biegefestigkeit	$\sigma_B$	[MPa]	150	50 <sup>*)</sup>	200	20	80	300
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	300	90	300	--	80	250
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	--	--	--	--	--	--
Spannungsintensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa √m]	--	--	--	--	--	--

#### elektrisch:

Durchschlagsfestigkeit	E <sub>d</sub>	[kV/mm]	13	--	20	--	--	20
Stehspannung, min.	U	[kV]	20	--	30	--	--	30
Permittivitätszahl 48-62 Hz	$\epsilon_r$	[--]	7	10	--	--	--	8 - 12
Verlustfaktor bei 20 °C, 48-62 Hz	$\tan \delta_{pf}$	[10 <sup>-3</sup> ]	1	--	2	2	2	2
Verlustfaktor bei 20 °C, 1 MHz	$\tan \delta_{1M}$	[10 <sup>-3</sup> ]	1	--	2	2	2	2
Spezifischer Widerstand b. 20 °C	$\rho_{V>20}$	[Ωm]	10 <sup>12</sup>	--	10 <sup>12</sup>	10 <sup>12</sup>	--	10 <sup>11</sup>
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	$\rho_{V>600}$	[Ωm]	10 <sup>7</sup>	--	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	--	10 <sup>2</sup>

#### thermisch:

Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient bei 30-600 °C	$\alpha_{30-600}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	7 - 8,5	11 - 13	4,5 - 5	--	2,5 - 3,5	2,5 - 3,5
Spezifische Wärmekapazität bei 30-600 °C	C <sub>p,30-600</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1.000 - 1.250	850 - 1.050	800 - 900	900 - 1.050	750 - 850	750 - 850
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{30-100}$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	150 - 220	6 - 10	> 100	10 - 50	5 - 15	15 - 45
Temperaturwechselbeständigkeit		bewertet	gut	sehr gut	gut	gut	gut	gut
Max. Einsatztemperatur	T	[°C]	--	--	--	--	--	--

\*) 3-Pkt Biegefestigkeitswerte

**Tabelle 42:** Kennwerte für andere Oxidkeramikwerkstoffe (C 800) und Nichtoxidwerkstoffe (C 900)

## Anhang

### 10.9.2 Nicht genormte Hochleistungswerkstoffe

#### 10.9.2.1 Oxidkeramiken

	Symbol	Typ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZTA	PSZ			
		Einheit	Aluminium-oxid < 90 %	Aluminium-oxid 92-96 %	Aluminium-oxid 99 %	Aluminium-oxid > 99 %	Aluminium-oxid/ZrO <sub>2</sub> -verstärkt	Teilstabilisiertes ZrO <sub>2</sub>
<b>mechanisch:</b>								
Offene Porosität		[Vol %]	0	0	0	0	0	0
Dichte, min.	ρ	[g/cm <sup>3</sup> ]	> 3,2	3,4 - 3,8	3,5 - 3,9	3,75 - 3,98	4,0 - 4,1	5 - 6
4-Pkt.-Biegefestigkeit	σ <sub>B</sub>	[MPa]	> 200	230 - 400	280 - 400	300 - 580	400 - 480	500 - 1.000
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	> 200	220 - 340	220 - 350	300 - 380	380	200 - 210
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	12 - 15	12 - 15	12 - 20	17 - 23	16 - 17	11 - 12,5
Spannungsintensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa √m]	3,5 - 4,5	4 - 4,2	4 - 4,2	4 - 5,5	4,4 - 5	5,8 - 10,5
Weibull-Modul	m	[--]	10 - 15	10 - 15	10 - 15	10 - 15	10 - 15	20 - 25

#### elektrisch:

Durchschlagsfestigkeit	E <sub>d</sub>	[kV/mm]	10	15	15	17	--	--
Stehspannung, min.	U	[kV]	15	18	18	20	--	--
Permittivitätszahl 48-62 Hz	ε <sub>r</sub>	[--]	9	9	9	9	--	22
Verlustfaktor bei 20 °C, 48-62 Hz	tan δ <sub>pf</sub>	[10 <sup>-3</sup> ]	0,5 - 1,0	0,3 - 0,5	0,2 - 0,5	0,2 - 0,5	--	--
Verlustfaktor bei 20 °C, 1 MHz	tan δ <sub>1M</sub>	[10 <sup>-3</sup> ]	1	1	1	1	--	--
Spezifischer Widerstand b. 20 °C	ρ <sub>V&gt;20</sub>	[Ωm]	10 <sup>12</sup> - 10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup> - 10 <sup>14</sup>	10 <sup>12</sup> - 10 <sup>15</sup>	10 <sup>12</sup> - 10 <sup>15</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>8</sup> - 10 <sup>13</sup>
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	ρ <sub>V&gt;600</sub>	[Ωm]	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup>

#### thermisch:

Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient b. 30-1000 °C	α <sub>30-1000</sub>	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	6 - 8	6 - 8	6 - 8	7 - 8	9 - 11	10 - 12,5
Spezifische Wärmekapazität bei 30-1000 °C	C <sub>p,30-1000</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	850 - 1.050	850 - 1.050	850 - 1.050	850 - 1.050	800	400 - 550
Wärmeleitfähigkeit	λ <sub>30-100</sub>	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	10 - 16	14 - 24	16 - 28	19 - 30	15	1,5 - 3
Temperaturwechselbeständigkeit		bewertet	gut	gut	gut	gut	gut	gut
Max. Einsatztemperatur	T	[°C]	1.200 - 1.400	1.400 - 1.500	1.400 - 1.500	1.400 - 1.700	1500	800 - 1.600

**Tabelle 43:** Kennwerte für Oxidkeramiken

## 10.9.2.2 Carbide

		Typ	LPSIC	SSIC	SISIC	RSIC	NSIC
	Symbol	Einheit	flüssigph. gesintertes Silicium-carbid	drucklos gesintertes Silicium-carbid	silicium-infiltriertes Silicium-carbid	rekristallisiertes Silicium-carbid	nitridgebundenes Silicium-carbid
<b>mechanisch:</b>							
Offene Porosität		[Vol %]	< 1	0	0	10 - 15	10 - 15
Dichte, min.	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	3,20 - 3,24	3,08 - 3,15	3,05 - 3,12	2,6 - 2,8	2,7 - 2,82
4-Pkt.-Biegefestigkeit	$\sigma_B$	[MPa]	600	260 - 500	180 - 450	80 - 120	180 - 200
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	420	350 - 450	270 - 400	230 - 280	150 - 240
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	22	23 - 26	14 - 25 <sup>*)</sup>	25	--
Spannungsintensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa √m]	6,0	3,0 - 4,8	3 - 5	3 - 4	--
Weibull-Modul	m	[--]	10 - 15	9 - 19	14 - 16	10 - 12	10 - 12

### elektrisch:

Spezifischer Widerstand b. 20 °C	$\rho_{V>20}$	[ $\Omega$ m]	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>	10 <sup>1</sup> - 10 <sup>3</sup>	--	--
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	$\rho_{V>600}$	[ $\Omega$ m]	10 <sup>1</sup>	10 <sup>1</sup>	5	--	--

### thermisch:

Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient b. 30-1000 °C	$\alpha_{30-1000}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	4,1	4,0 - 4,8	4,0 - 4,8	4,7 - 4,8	4,5
Spezifische Wärmekapazität bei 30-1000 °C	C <sub>p,30-1000</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	600	600 - 1.000	650 - 1.300	600 - 900	800 - 900
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{30-100}$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	100	40 - 120	100 - 160	18 - 20	14 - 15
Temperaturwechselbeständigkeit		bewertet	gut	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Max. Einsatztemperatur	T	[°C]	1.200 - 1.400	1.400 - 1.750	1.380	1.600	1.450

\*) Zweiphasiger Werkstoff

Tabelle 44: Kennwerte für Carbide

## Anhang

### 10.9.2.3 Nitride

	Symbol	Typ	SSN	HIPSN	RBSN	BN	AlN
		Einheit	gesintertes Siliciumnitrid	heiß-iso. gepresstes Siliciumnitrid	reaktionsgebundenes Siliciumnitrid	Bornitrid	Aluminiumnitrid
<b>mechanisch:</b>							
Offene Porosität		[Vol %]	--	0	--	0	0
Dichte, min.	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	3,2 - 3,3	3,2 - 3,3	1,9 - 2,5	2,0 - 2,1	3,0 - 3,3
4-Pkt.-Biegefestigkeit	$\sigma_B$	[MPa]	700 - 1.000	800 - 1.100	200 - 330	--	200 - 360
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	290 - 330	290 - 330	80 - 180	--	320
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	14 - 16	15 - 17	8 - 10	--	11
Spannungsintensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa √m]	5 - 8,5	8,5	1,8 - 4,0	--	3,0 - 3,5
Weibull-Modul	m	[--]	10 - 15	12 - 20	14 - 16	10 - 12	10 - 12

#### elektrisch:

Durchschlagsfestigkeit	E <sub>d</sub>	[kV/mm]	20	20	--	7	> 20
Stehspannung, min.	U	[kV]	--	--	--	--	--
Permittivitätszahl 48-62 Hz	$\epsilon_r$	[--]	8 - 12	8 - 12	--	--	8,6
Verlustfaktor bei 20 °C, 48-62 Hz	$\tan \delta_{1k}$	[10 <sup>-3</sup> ]	2	2	2	2	--
Verlustfaktor bei 20 °C, 1 MHz	$\tan \delta_{1M}$	[10 <sup>-3</sup> ]	2	2	2	2	0,4 - 0,5
Spezifischer Widerstand b. 20 °C	$\rho_{V>20}$	[Ωm]	10 <sup>11</sup> - 10 <sup>12</sup>	10 <sup>13</sup>	10 <sup>13</sup>	--	10 <sup>13</sup> - 10 <sup>14</sup>
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	$\rho_{V>600}$	[Ωm]	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>	--	10 <sup>12</sup>

#### thermisch:

Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient b. 30-1000 °C	$\alpha_{30-1000}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	2,5 - 3,5	3,1 - 3,3	2,1 - 3	2,2 - 4,4	4,5 - 5,6
Spezifische Wärmekapazität bei 30-1000 °C	C <sub>p,30-1000</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	700 - 850	700 - 850	700 - 850	--	700 - 760
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{30-100}$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	15 - 40	15 - 50	4 - 15	< 1	180 - 220
Temperaturwechselbeständigkeit		bewertet	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Max. Einsatztemperatur	T	[°C]	1.300	1.400	1.400	800 - 1.000	1.000

Tabelle 45: Kennwerte für Nitride

## 10.9.2.4 Weitere Werkstoffe

	Symbol	Typ Einheit	ATI Aluminium- titanat	MGO Magnesi- umoxid dicht	MGO Magnesi- umoxid > 90 %	SiO <sub>2</sub> Silicium- oxid (Quarzgut)	BC Borcarbid
<b>mechanisch:</b>							
Offene Porosität		[Vol %]	10 - 16	0	25 - 45	7	0
Dichte, min.	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	3,0 - 3,7	3,4	2,0 - 2,7	1,9 - 2,0	2,50
4-Pkt.-Biegefestigkeit	$\sigma_B$	[MPa]	15 - 100	165	8 - 50	30 - 40	400
Elastizitätsmodul	E	[GPa]	10 - 50	250	90	30 - 40	390 - 440
Härte	HV <sub>10</sub>	[GPa]	5	--	--	--	30 - 40
Spannungs- intensitätsfaktor	K <sub>IC</sub>	[MPa $\sqrt{m}$ ]	3 - 5	--	--	--	3,2 - 3,6
Weibull-Modul	m		10 - 12	10 - 12	10 - 12	10 - 12	10 - 15

### elektrisch:

Durchschlags- festigkeit	E <sub>d</sub>	[kV/mm]	--	--	--	--	--
Stehspannung, min.	U	[kV]	--	--	--	--	--
Permittivitätszahl 48-62 Hz	$\epsilon_r$	[--]	--	10	10	--	--
Verlustfaktor bei 20 °C, 48-62 Hz	$\tan \delta_{pf}$	[10 <sup>-3</sup> ]	--	--	--	--	--
Verlustfaktor bei 20 °C, 1 MHz	$\tan \delta_{1M}$	[10 <sup>-3</sup> ]	--	--	--	--	--
Spezifischer Widerstand b. 20 °C	$\rho_{V>20}$	[ $\Omega m$ ]	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	--	--
Spezifischer Widerstand b. 600 °C	$\rho_{V>600}$	[ $\Omega m$ ]	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	--	--

### thermisch:

Mittlerer Längen- ausdehnungskoeff- fizient b. 30-1000 °C	$\alpha_{30-1000}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	0,5 - 2	13,5	12 - 13	0,5 - 0,9	6
Spezifische Wärmekapazität bei 30-1000 °C	C <sub>p,30- 1000</sub>	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	800	850 - 1.050	850 - 1.050	--	--
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{30-100}$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1,5 - 3,0	7 - 11	6 - 10	--	28
Temperaturwech- selbeständigkeit		bewertet	extrem gut	gut	sehr gut	sehr gut	--
Max. Einsatz- temperatur	T	[°C]	900 - 1.600	--	--	1.000	700 - 1.000

Tabelle 46: Kennwerte für weitere Werkstoffe

### 10.9.3 Übersicht zur chemischen Beständigkeit

Tabelle 47 zeigt einen Vergleich der Korrosionsbeständigkeit keramischer Werkstoffe. In Tabelle 48 ist die Korrosionsbeständigkeit von SISIC, SSIC und Aluminiumoxid zu einer Vielzahl von Reagenzien dargestellt.

	Oxide		Carbide		Nitride		Silikate		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	SSIC	SISIC	SSN	HPSN	Steinzeug	Hartporzellan	Steatit
Salzsäure HCl (verd.)	+	-	+	+	+		+	+	+
	(*)			(100 °C)	(*)		(*)	(*)	(*)
Salzsäure HCl (konz.)	+	o	+	+	-	+	+	+	+
	(*)		(*)				(*)	(*)	(*)
Salpetersäure HNO <sub>3</sub> (verd.)	+		+	+	+	+	+	+	+
			(*)	(*)	(*)		(*)	(*)	(*)
Salpetersäure HNO <sub>3</sub> (konz.)	+	o	+	+			+	+	+
	(*)		(*)	(*)					
Schwefelsäure H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (verd.)	+			+	+		+	+	+
				(100 °C)			(*)	(*)	(*)
Schwefelsäure H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (konz.)	+	-	+	+			+	+	+
	(*)	(*)					(*)	(*)	(*)
Phosphorsäure H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	+	o	-	+	o	+	80 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	80 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	80 % H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
	(20 °C)	(*)	(250 °C)				+	+	+
							(*)	(*)	(*)
Flusssäure HF	-	-	+	+	-	-	-	-	-
		(20 °C)							
Natronlauge NaOH-Lsg.	o		+	o	+	+	-	-	-
	(*)			(100 °C)			(*)	(*)	(*)
Kalilauge KOH-Lsg.	+	+	+	o	+	+			
	(*)	(*)	(*)	(80 °C)	(*)				
Natriumchlorid NaCl	+			+			+	+	+
	(*)			(900 °C in Luft)			(*)	(*)	(*)
Kaliumchlorid KCl	+			+			+		
				(900 °C in Luft)					
Kupferchlorid CuCl <sub>2</sub>	(*)						+	+	+

Legende:

- + beständig (bis zur angegebenen Temperatur)
- Korrosionsangriff (bei angegebener Temperatur)
- (\*) kochend
- o es findet eine Reaktion statt

**Tabelle 47:** Korrosionsbeständigkeit keramischer Werkstoffe im Vergleich

## Korrosionsbeständigkeit von SISIC, SSIC und Aluminiumoxid

Werkstoff			SISIC		SSIC		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99,7 %)	
Agenz	Formel	Konzentration	RT	50°C	RT	50°C	RT	50°C
4-Chlortoluol	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> ClCH <sub>3</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Aceton	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Acetylchlorid	CH <sub>3</sub> COCl	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Aluminiumchlorid	AlCl <sub>3</sub>	10 %	++	++	++	++	++	++
Ameisensäure	HCOOH	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Ammoniak	NH <sub>4</sub> OH	konzentriert (25 %)	++	+	++	++	++	++
Ammoniumchlorid	NH <sub>4</sub> Cl	25 %	++	++	++	++	++	++
Ammoniumfluorid	NH <sub>4</sub> F	20 %	+	-	++	++	++	++
Ammoniumnitrat	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	50 %	++	++	++	++	++	++
Anilin	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Benzoessäure	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> COOH	alk. Lösung	++	++	++	++	y)	y)
Benzol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Borsäure	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	kalt ges. Lsg.	++	++	++	++	++	++
Bromwasser	Br	kalt ges. Lsg.	++	++	++	++	++	y)
Chromschwefelsäure	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -CrO <sub>3</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Dioxan	(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Eisen-III-Chlorid	FeCl <sub>3</sub>	45 %	++	++	++	++	++	++
Eisen-II-Sulfat	FeSO <sub>4</sub>	25 %	++	++	++	++	++	++
Eisessig	CH <sub>3</sub> COOH	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Ethylacetat	CH <sub>3</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Flusssäure	HF	konzentriert, 40 %	+	-	++	++	++	-
Flusssäure-Salpetersäure	HF-HNO <sub>3</sub>	konzentriert, 3:1	-	-	++	+	y)	y)
Glyzerin	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Harnstoff	H <sub>2</sub> NCONH <sub>2</sub>	kalt ges. Lsg.	++	++	++	++	y)	y)
Hexafluorokieselsäure	H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Kalilauge	KOH	30 %	-	-	++	++	y)	y)
Kalilauge	KOH	20 %	+	o	++	o	y)	y)
Kaliumchlorid	KCl	kalt ges. Lsg.	++	++	++	++	++	++
Kaliumchromat	K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	35 %	++	++	++	++	y)	y)

## Anhang

Werkstoff			SISIC		SSIC		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99,7 %)	
			RT	50°C	RT	50°C	RT	50°C
Agenz	Formel	Konzentration	RT	50°C	RT	50°C	RT	50°C
Kaliumnitrat	KNO <sub>3</sub>	20 %	++	++	++	++	++	++
Kaliumpermanganat	KMnO <sub>4</sub>	5 %	++	++	++	++	++	++
Kalziumoxid	CaO	kalt ges. Lsg.	++	++	++	++	y)	y)
Königswasser	HCl-HNO <sub>3</sub>	konzentriert, 3:1	++	++	++	++	++	-
Kupfer-II-Chlorid	CuCl <sub>2</sub>	40 %	++	++	++	++	++	++
Kupfer-II-Sulfat	CuSO <sub>4</sub>	25 %	++	++	++	++	++	++
Lithiumhydroxid	LiOH	10 %	++	+	++	++	y)	y)
Magnesiumsulfat	MgSO <sub>4</sub>	4 %	++	++	++	++	++	++
Methanol	CH <sub>3</sub> OH	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Mischsäure	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +HNO <sub>3</sub>	konzentriert, 1:1	++	++	++	++	y)	y)
Natriumcarbonat	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	15 %	++	++	++	++	y)	y)
Natriumchlorid	NaCl	kalt ges. Lsg.	++	++	++	++	++	++
Natriumfluorid	NaF	4 %	++	+	++	++	y)	y)
Natriumhypochlorid	NaClO	12,5 % freies Cl	++	++	++	++	++	y)
Natriummetaborat	NaBO <sub>2</sub>	20 %	++	++	++	++	y)	y)
Natriumperoxid	Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	10 %	++	++	++	++	++	++
Natriumsulfid	Na <sub>2</sub> S	50 %	++	++	++	++	++	++
Natriumthiosulfat	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40 %	++	++	++	++	++	++
Natronlauge	NaOH	10 %	+	-	++	++	++	+
Natronlauge	NaOH	30 %	-	o	++	o	++	+
Oelsäure	C <sub>17</sub> H <sub>33</sub> COOH	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Oxalsäure	(COOH) <sub>2</sub>	kalt ges. Lsg	++	++	++	++	y)	y)
Phosphorsäure	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Konzentriert, 85 %	++	++	++	++	++	-
Phthalsäure	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (COOH) <sub>2</sub>	alk. Lösung	++	++	++	++	y)	y)
Propionsäure	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> (COOH)	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Quecksilbernitrat	Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	10 %	++	++	++	++	y)	y)
Salicylaldehyd	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Salpetersäure	HNO <sub>3</sub>	konzentriert, 65 %	++	++	++	++	++	+
Salzsäure	HCl	konzentriert, 36 %	++	++	++	++	++	++
Schwefelige Säure	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	5-6 % freies SO	++	++	++	++	y)	y)
Schwefelsäure	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	konzentriert 98 %	++	++	++	++	++	+
Schwefelsäure	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50 %	++	++	++	++	++	++

Werkstoff			SISIC		SSIC		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99,7 %)	
Agenz	Formel	Konzentration	RT	50°C	RT	50°C	RT	50°C
Schwefelsäure, oleum	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +SO <sub>3</sub>	30 % freies SO	++	++	++	++	y)	y)
Silbernitrat	AgNO <sub>3</sub>	10 %	++	++	++	++	y)	y)
Tetrachlorethylen	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Tetrachlorkohlenstoff	CCl <sub>4</sub>	konzentriert	++	++	++	++	y)	y)
Tetrafluoroborsäure	BF <sub>3</sub>	konzentriert	+	+	++	++	y)	y)
Tri-Natriumphosphat	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	10 %	++	++	++	++	y)	y)
Wasserstoffperoxid	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	30 %	++	++	++	++	y)	y)
Weinsäure	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	10 %	++	++	++	++	y)	y)
Zinkchlorid	ZnCl <sub>2</sub>	60 %	++	++	++	++	++	++
Zitronensäure	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	50 %	++	++	++	++	y)	y)

++ beständig

o Lösung kochend

+ bedingt beständig

y) fehlende Werte

- unbeständig

**Tabelle 48:** Korrosionsbeständigkeit von SISIC, SSIC und Aluminiumoxid

Die in Tabelle 48 angegebenen Aussagen können wegen Unterschieden im Gefüge und der chemischen Zusammensetzung schwanken. Es empfiehlt sich deshalb, Werte bei den Herstellern zu erfragen.

# 11 Literaturverzeichnis

- Bunk W.; Hansen J.; Geyer M.:* Tribologie: Reibung – Verschleiß – Schmierung, Springer-Verlag, Berlin 1981
- Czichos, H.; Habig, K.-H.:* Tribologie-Handbuch, Reibung und Verschleiß, Systemanalyse, Prüftechnik, Werkstoffe und Konstruktionselemente, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1992
- Fanzott, S. M.:* Technische Keramik. Rohstoffe, Eigenschaften und Einsatzgebiete, Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech 1987
- Gläser, H.; Lori, W.; Schröpel, H.:* Keramikgerechtes Konstruieren, Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, Darmstadt 1992
- Hecht, A.:* Elektrokeramik, Springer-Verlag, Berlin 1976
- Höhne, L.:* Honen technischer Keramik, Vulkan-Verlag, Essen 1999, zugl. Dissertation, TU Braunschweig 1998
- Kriegesmann, J.:* Technische keramische Werkstoffe, Blättersammlung, Deutscher Wirtschaftsdienst, Köln 1989–2003
- Liebermann J.:* Hydrophobes Oberflächenverhalten verbessert das elektrische Fremdschichtverhalten von Porzellanisolatoren und erlaubt vereinfachte Bauformen, in: *Keramische Zeitschrift*, 54 (2002), S. 554–559
- Liebermann J.:* Neue Entwicklungsvarianten hochwertiger kostengünstiger Hochspannungsisolationsporzellane, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg 2000,
- Pigores, O.:* Werkstoffe in der Tribotechnik: Reibung, Schmierung und Verschleißbeständigkeit von Werkstoffen und Bauteilen. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart 1992
- Salmang, H., Scholze, H.:* Keramik, Teil 1: Allgemeine Grundlagen und wichtige Eigenschaften, Springer-Verlag, Berlin 1982
- Salmang, H., Scholze, H.:* Keramik, Teil 2: Keramische Werkstoffe, Springer-Verlag, Berlin 1982
- Schneider, J.:* Schneidkeramik. Anwendungsgebiete und Einsatzmöglichkeiten, Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech 1996
- Telle, R.; Quirnbach, T.:* Korrosion und Verschleiß von Keramischen Werkstoffen, Deutsche Keramische Gesellschaft e.V., Köln 1994
- Tietz, H.:* Technische Keramik, VDI Verlag, Düsseldorf 1994

- Verband der Keramischen Industrie e.V.:* Daten und Eigenschaften keramischer Werkstoffe, Selbstverlag, Selb 1997
- Verband der Keramischen Industrie e.V.:* Keramische Werkstoffe für die Elektrotechnik, Selbstverlag, Selb 1996
- Verband der Keramischen Industrie e.V.:* Keramische Werkstoffe für die Elektronik, Selbstverlag, Selb 1996
- Verband der Keramischen Industrie e.V.:* Keramische Werkstoffe für den Maschinenbau und die Verfahrenstechnik, Selbstverlag, Selb 1996
- Verband der Keramischen Industrie e.V.:* Keramische Werkstoffe für die Hochtemperaturtechnik, Selbstverlag, Selb 1996
- Verein Deutscher Ingenieure:* Konstruieren mit Keramik (VDI Bericht 1036), VDI Verlag, Düsseldorf 1993
- Weigmann, U.-P.:* Honen keramischer Werkstoffe. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Dissertation, TU Berlin, Berlin 1997
- Willmann, G.:* Biokeramik in der Orthopädie – Was haben wir aus 25 Jahren gelernt?, in: Med. Orth. Tech., 120 (2000), S.10–6
- Wimmer, J.:* Konditionieren hochharter Schleifscheiben zum Schleifen von Hochleistungskeramik, Dissertation, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern 1995
- Woydt, M.:* Beschaffung innovativer Werkstoffe, in Tribologie + Schmierungstechnik, 45 (1998), 37–41.
- Woydt, M.:* Werkstoffkonzept für den Trockenlauf, in: Tribologie + Schmierungstechnik, 44 (1997), 14–19.
- Zum Gahr, K.-H.:* Grundlagen des Verschleißes, (VDI Bericht Nr. 600.3), VDI Verlag, Düsseldorf 1987, S. 29–59.
- Zum Gahr, K.-H.:* Tribologie: Reibung – Verschleiß – Schmierung, in: Naturwissenschaften, 72 (1985), S. 260–267.

# 12 Register

<b>3-Punkt-Biegeverfahren</b>	227	<b>Dichte</b>	101
<b>4-Punkt-Biegeverfahren</b>	228	Dielektrische Verlust	119
<b>Abrasion</b>	131	Drehmomentübertragung	198
Adhäsion	131	Druckfestigkeit	105
Aktivlöten	203	Druckgießen	76
ALN	61	<b>E-Modul</b>	109, 231
Aluminiumnitrid	61	Ebenheit	218
Aluminiumoxid	32, 82	Eigenschaften	99ff.
Aluminiumtitanat	40	Eigenschaftstabellen	262ff.
Anlagenbau	145	Eigenschaftsvergleich	98, 100
AQL	207	Elastizitätsmodul	109
ATI	40	Elektrische Eigenschaften	118ff.
Ausbrennen	77	Elektrischer Widerstand	118
Aufmaß	81	Elektrokeramik	20
<b>Bariumtitanat</b>	42	Elektronik	157
Bauteilentwurf	162ff.	Endbearbeitung	84
Bauteilgestaltung	170, 173	Engobieren	92
Bauteilkosten	168	Entwicklungsablauf	164
Bearbeitungsverfahren	75	Extrudieren	73
Belastbarkeitssteigerung	172	<b>Faserkeramik</b>	63
Beschichtung	92ff.	Fehlstellenkorrosion	121
Biegefestigkeit	103, 226	Feinkeramik	18
Biegewandler	47	Festigkeit	103
Biokeramik	20	Festigkeitsauslegung	169
Bleizirkonattitanat	43ff.	Feuchtpressen	72
Borcarbid	58	Flächenkorrosion	120
Brennen	78	Flüssigphasenkorrosion	122, 125
Brennhilfsmittel	223	Foliengießen	74
Brennertechnik	150	Formgebung	70, 165f.
<b>Carbid</b>	50	Formtoleranzen	218
Chemietechnik	148	Formschluss	192
Chemische Beständigkeit	274ff.	FSZ	36
Cordierit	29	Fügetechnik	167, 188
Cp-Wert	243	Funktionskeramik	20
		Funktionstrennung	162

<b>G</b> eradheit	218	Korrosionsarten	122ff.
Gestaltungsregeln	170ff.	Korrosionsbeständigkeit	275ff.
Glasieren	91, 167	Korrosionsmechanismus	120
GPSSN	59	Korrosionsmessung	125ff.
Grobkeramik	18	Kovalente Bindung	209
Grünbearbeitung	83	Kraftschluss	192
Grünling	77	Kriechverhalten	112
<b>H</b> artbearbeitung	84	<b>L</b> ängenausdehnung	115
Härte	112, 230	Läppen	88
Hartlöten	202	Laugenkorrosion	123
Heißgaskorrosion	124	Literatur	278f.
Heißisostatisches Pressen	81	Löten	202
Heißpressen	81	LPSIC	52
Herstellungsprozess	68	 	
Hochfrequenzsteatit	28	<b>M</b> agnesiumoxid	35
Hochleistungskeramik	19	Maschinenbau	145
Hochspannungstechnik	157	Masseaufbereitung	69
Honen	87	Maßtoleranz	213
HPSIC	54	Materialanteil	232, 236
HPSN	59	Mechanische Eigenschaften	101ff.
Hydrothermale Korrosion	123	Messverfahren	226
 		Metallisieren	91
<b>I</b> ndustriekeramik	19	Metallische Bindung	209
Ingenieurkeramik	19	Metallverarbeitung	148
Intergranulare Korrosion	121	Metall-Matrix-Composit	64
Ionische Bindung	209	Mikrogefüge	67
Isolierteile	155	Mittenrauwert	232
Isostatisches Pressen	72, 75	MMC	63
 		Modultechnik	162, 167
<b>K</b> eramik	18	Motorenbau	150
Keramische Schicht	92	Mullit	31
$K_{IC}$	109	Multilayeraktor	46
Kleben	197ff.	 	
Klebstoffarten	198	<b>N</b> asspressen	72
Konstruieren	160ff.	Nichtoxidkeramik	22, 25
Konstruktionsbeispiele	173ff.	Nitrid	58
Konstruktionskeramik	19	Normalverteilung	240f.
Kornwachstum	79	Normung	23
Korrosion	119	Normen	248ff.
		NSIC	57

## Register

---

<b>O</b> berfläche	231, 234	Schubmodul	110
Oberflächenzerrüttung	131	Schwindung	81f.
Ofenbau	150	SIALON	61
Oxidkeramik	21, 32	Selektive Korrosion	120
Oxynitrid	61	SiC	50
		Siliciumcarbid	50
<b>P</b> apiermaschinen	145	Siliciumnitrid	58
Permittivität	119	Siliciumoxidkeramik	49
Piezo	43ff.	silikatisch gebundenes SiC	51
Piezotechnik	157	Silikatkeramik	20, 24, 27, 30
Plasmaspritzen	92	Sintern	77f., 183
Polieren	90	Sintertemperaturen	80
Porosität	102	SISIC	55, 82
Porzellan	27	Sondersteatit	28
Pressen	179	Spannungsintensitätsfaktor	108
Prozessfähigkeit	243	SPC	206, 246
PSZ	37	Spritzgießen	73
PTC-Keramik	42	SRBSN	60
Pumpenbauteile	145	SSIC	53
PZT	43	SSN	59
		Steatit	28
<b>Q</b> uartzporzellan	28	Strangpressen	73, 183
Quarzgut	49	Strahlverschleiß	137
Querkontraktion	110	Streuung	245
		Strukturkeramik	19
<b>R</b> auheitsprofil	237		
Rautiefe	231	<b>T</b> echnische Keramik	18
RBSN	60	Technische Porzellane	27
Regelkarte	242	Temperaturfestigkeit	105
Reibung	129	Temperaturwechsel- beständigkeit	116
Risswachstum	110f.	Textilmaschinen	146
Rohstoff	69	Thermischer Ausdehnungs- koeffizient	115
RSIC	56	Thermische Eigenschaften	114
		Titandioxid	42
<b>S</b> äurenkorrosion	122	Toleranzen	212
Schleifen	85ff.	Toleranztabelle	216
Schlickergießen	74	Tonerdeporzellan	27
Schmelzenkorrosion	123f.		
Schneidkeramik	20		

Traganteil	232, 236	<b>Zerspanung</b>	140f.
Transportrollen	225	Zirkoniumoxid	36, 82
Tribochemische Reaktion	131	Zirkoniumoxidverstärktes Aluminiumoxid	39
Tribologie	129	ZTA	39
Trockenpressen	71, 180	Zugfestigkeit	105
Trocknen	77		
TZP	37		
<b>UCI-Verfahren</b>	230		
Umspritzen mit Kunststoff	196		
Universalhärtemessung	230		
<b>V</b> an der Waal'sche Kräfte	209		
Verbindungsgestaltung	192		
Verbindungstechnik	186		
Verfahrenstechnik	148		
Verglühen	78		
Verkoken	78		
Verlustfaktor	119		
Verschleiß	128		
Verschleißarten	130		
Verschleißmechanismen	131		
Verschleißmessgrößen	134f.		
Verschleißmessung	135ff.		
Verschleißschutz	137		
Verschleißschutzplatten	223		
Vorbrand	78		
<b>W</b> ärmeleitfähigkeit	114		
Wasserkorrosion	123		
Weibull-Modul	106f.		
Weichlöten	202		
Weißbearbeitung	84		
Werkstoffdaten	166		
Werkstoffe	24ff.		
Werkstofftabellen	263ff.		
Werkstoffvergleich	100, 210		
Widerstand	118		