

## Ingenieurkeramiken für den Einsatz in Prozesspumpen in der chemischen Verfahrenstechnik

**hightech ceram Dr. Steinmann  
+ Partner GmbH**

Lühbergstr. 2 · 53945 Blankenheim

Tel.: +49 2449 911003

Fax: +49 2449 911005

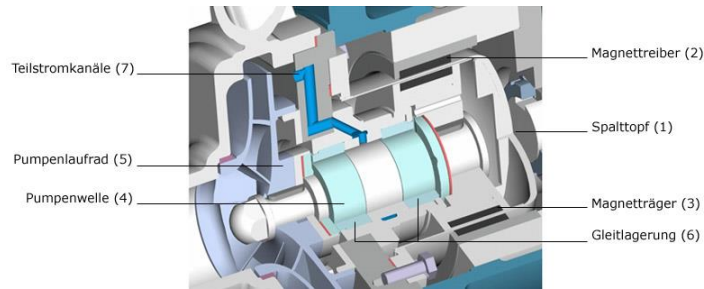
Mail: [info@hightech-ceram.de](mailto:info@hightech-ceram.de)

Web: [www.hightech-ceram.net](http://www.hightech-ceram.net)

Pumpen sind Maschinen, mit denen diverse Flüssigkeiten, Flüssigkeits-Feststoff-Gemische, Pasten und Gas enthaltene Flüssigkeiten gefördert werden. Je nach Medium werden alle Komponenten die mit dem Medium in Berührung kommen Korrosion und Verschleiß ausgesetzt, erst recht, wenn sich Komponenten, wie Gleitringe in Gleitringdichtungen, Gleitlager und Wellenschutzhülsen gegeneinander reiben. Die mechanische und chemische Resistenz einiger Keramiken ermöglicht die Positionierung, zum Beispiel des Lagers, in dem zu fördernden Medium, welches dadurch auch für die Schmierung zuständig ist.

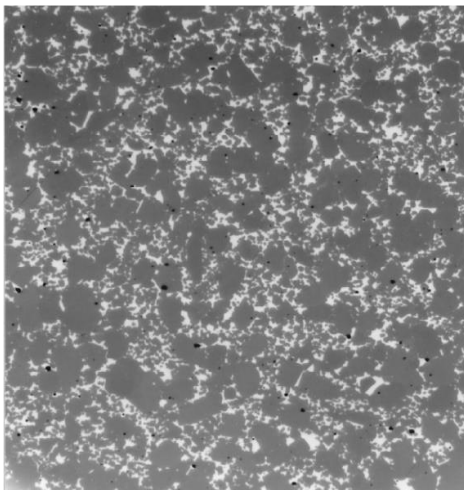
Gleitringdichtungen in Pumpen (es gibt sowohl radiale und axiale Dichtungen) übernehmen die Abdichtung der rotierenden Welle gegenüber dem Pumpengehäuse. Die Hauptkomponenten sind zwei Gleitringe, die aufeinander gleiten, wobei der eine Ring fest im Gehäuse und der andere auf der Welle befestigt ist und durch eine Feder gegen den feststehenden Ring gepresst wird. Die gegen einander gleitenden Partner weisen in der Regel plangeschliffenen Flächen auf. Gleitringe bestehen vorwiegend aus Kohlenstoff-Graphitwerkstoffen, Metall oder Keramik. Es gibt jedoch auch Gleitringe aus kunstharzgebundenem Kohlenstoff oder Kunststoff. Das umgebende Medium erzeugt im Dichtspalt zwischen den Dichtungsflächen einen Schmierfilm, der verhindert, dass die Dichtung trocken läuft. Verwendet werden Gleitringdichtungen in einer hart-hart Paarung oder hart-weich-Paarung, je nach Medium. Feststoffbeladene Flüssigkeiten sind abrasiv und hier sind hart-hart-Paarungen von Vorteil. Allerdings haben diese schlechtere Notlaufeigenschaften.

Gleitlager in Pumpen werden konstant mit dem zu fördernden Medium (Schmierstoff) versorgt, die über Schmiertaschen zugeführt werden können (hydrostatische Lager) und laufen dadurch nahezu Reibungsfrei. Hydrodynamische Lager dagegen arbeiten ohne Schmiertaschen. Hier gibt es beim An- und Auslaufen einen erhöhten Verschleiß durch Mischreibung hervorgerufenen Gleitwiderstand. Anwendung finden Gleitlager gerade in hermetisch gekapselten Pumpen, den Magnetpumpen, die durch ein permanentmagnetisches Antriebssystem betrieben werden. Die Dauermagnete sind durch einen nichtmagnetischen Spalttopf getrennt, der den mit dem Medium gefüllten Produktraum von der Umgebung hermetisch abtrennt. Hier gibt es entgegen den Gleitringdichtungen kein Austreten des Mediums (Leckage durch den Dichtungsspalt).

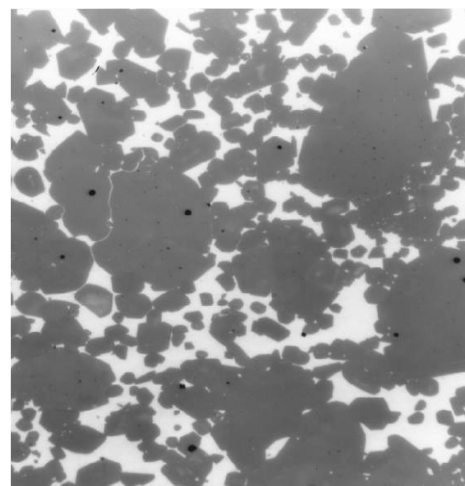


Darstellung einer Magnetpumpe (Quelle Klaus Union)

Mitte 1970 wurde zum ersten Mal Siliciumcarbid (SiC) als Gleitring in Gleitlagern in größerem Umfang sehr erfolgreich eingesetzt. Zu diesem Zeitpunkt gab es keramische Gleitringe nur in Aluminiumoxid, die jedoch wegen der deutlich besseren Eigenschaften des reaktions-gesinterten (infiltrierten) Siliciumcarbids (SiSiC) relativ schnell vom Markt verschwanden. Einen dichten, nahezu porenfreien SiSiC Werkstoff erhält man, in dem man einen Formkörper aus Siliciumcarbid und Kohlenstoff mit metallischen Silicium infiltriert. Das flüssige Si dringt in den porösen Formkörper ein und reagiert mit dem Kohlenstoff zu Sekundär-SiC und der nicht reagierte Si-Anteil füllt den restlichen Porenraum nahezu komplett auf. Die Reaktion des flüssigen Si mit dem Kohlenstoff ist exotherm und der Vorteil des Herstellprozesses ist, dass er ohne Schwindung erfolgt. Der so erhaltene dichte SiSiC Werkstoff ist gegen viele Medien korrosionsbeständig, weist eine hohe Festigkeit und hohe Härte auf und ist außerdem sehr verschleißfest. Dies macht SiSiC zu einem guten Gleitringwerkstoff, auch für hart-hart-Paarungen. Lediglich in basischen Medien und Flusssäure wird das freie, nicht reagierte Silicium korrosiv angegriffen.

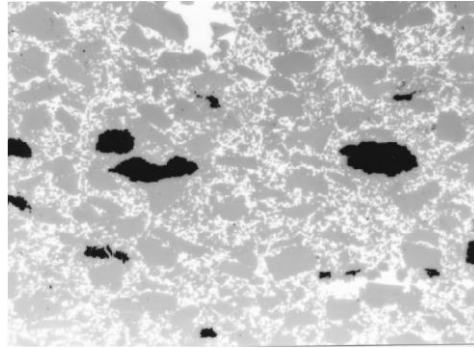


SiSiC Oberfläche ungeätzt 100:1



SiSiC Oberfläche ungeätzt 500:1

Die Mikroskopaufnahmen zeigen ein nahezu porenfreies SiSiC mit 8% freiem Silicium. In Grau die größeren SiC-Körner (Primär-SiC) sowie die kleineren (Sekundär-SiC) und in Weiß das freie Silicium.



SiSiC Oberfläche ungeätzt 100:1

Dieses Bild zeigt ein anderes SiSiC Material mit einer sichtbaren Restporosität und einem höheren Anteil an freiem Silicium (12%).

Durch Bearbeiten der Gleitflächen wird das weniger harte freie Si schneller abgetragen als die härteren SiC Kristalle. Dadurch liegen diese Flächen geringfügig tiefer, was den Vorteil hat, dass sich dort geringste Mengen des zu fördernden Mediums einlagern und vor allem beim An- und Auslaufen des Lagers als Notschmierstoff wirken, wodurch die Trockenreibung und dadurch der Verschleiß deutlich reduziert werden. Dies hat dazu geführt, dass die Lebensdauer der Dichtungen sehr deutlich verlängert wurde und die Dichtungshersteller weniger Ersatzkomponenten liefern konnten, was den Umsatz deutlich verringert hat. Die ursprüngliche Euphorie bei den Dichtungsherstellern verschwand und die Nachfrage nach SiSiC-Gleitringen brach ein. Die Anwender jedoch hatten die Vorteile bereits erfahren und haben Druck auf die Pumpenhersteller und diese wiederum auf die Dichtungshersteller ausgeübt und die SiC Gleitringe haben eine neue Renaissance erfahren.



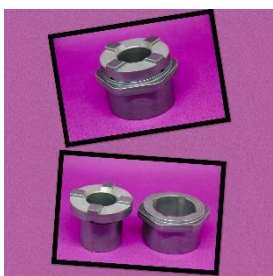
Gleitring aus Aluminiumoxid



Gleitring aus SiSiC



Gleitring, Axialscheibe und Umlenkrolle aus SiSiC



Gleitlager aus SiSiC



Wellenschutzhülse aus SiSiC



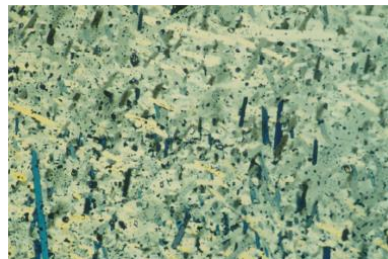
Gleitlagerbuchse aus SiSiC

Inzwischen wurde auch ein Si-freier, dichter reiner SiC-Werkstoff (SSiC) entwickelt, der aus sehr feinem SiC-Pulver mit geringen Mengen (<1 Gew.-%) Sinterhilfen hergestellt wird. Das feine SiC-Pulver im  $\mu$ -Bereich wird nach dem Pressen zum Formkörper bei sehr hohen Temperaturen von 2000 bis 2200°C unter Schutzgas drucklos gesintert. Durch die Sinterung erfährt der Formkörper eine Schwindung von ca. 18-20% und ist ebenso nahezu porenfrei. Der Werkstoff ist extrem korrosionsbeständig, auch gegen basische Medien, und weist neben hoher Härte, Festigkeit und Verschleißfestigkeit auch eine hohe Temperaturbeständigkeit auf. Der Werkstoff SSiC ist daher für höchste Ansprüche in der Chemischen Verfahrenstechnik geeignet und besonders prädestiniert für Gleitringdichtungen, Gleitlager und Wellenschutzhülsen in Chemiepumpen.

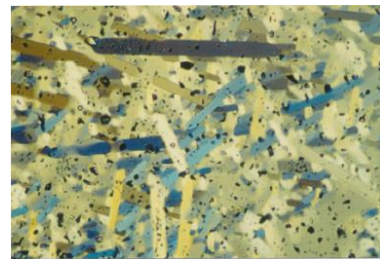
Reines gesintertes SiC ist der einzige bekannte Werkstoff, der eine universelle chemische Beständigkeit in allen flüssigen und gasförmigen Medien zeigt, bis zu Temperaturen von einigen hundert °C. Der Werkstoff weist auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit und Temperaturschockbeständigkeit aus.



Oberfläche SSiC geätzt (1000:1)



SSiC Dünnschliff Durchlicht 500:1



SSiC Dünnschliff Durchlicht 1000:1

Wie man den Bildern entnehmen kann, sind die SiC-Kristalle willkürlich ausgerichtet und eine sehr geringe Porosität ist ebenfalls zu sehen. Wie beim SiSiC ist die Abtragsrate an den verschiedenen ausgerichteten SiC-Kristallen im SSiC unterschiedlich, so dass sich auch hier eine Oberflächenstruktur ergibt mit sehr kleinen erhöhten und abgesenkten Bereichen. Das Medium kann auch hier in den winzigen Bereichen als Notschmierung wirken.



Gleitlager radial und axial aus SSiC



Gleitlager radial und axial aus SSiC



Gleitlagerbuchse aus SSiC





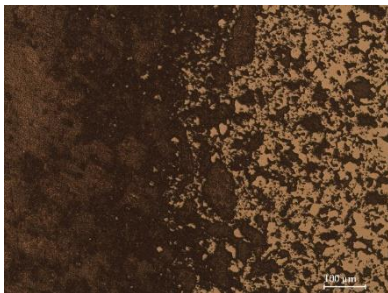
Eingeschrumpftes Gleitlager aus SSiC



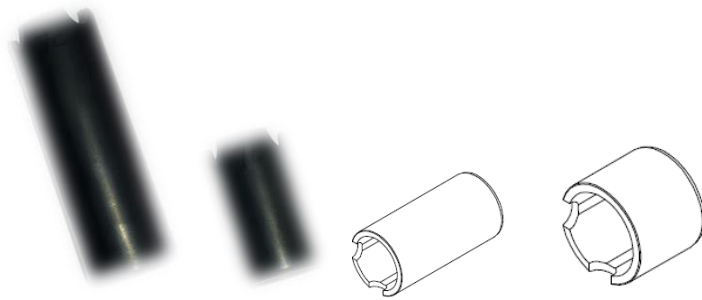
Polierte Gleitlagerscheibe aus SSiC

Wegen der einphasigen, homogenen Werkstoffqualität gibt es, auch nicht im Korngrenzen-bereich, keine selektiven Korrosionsvorgänge wodurch die chemische Beständigkeit bei weitem diejenige von z.B. Hartmetall, Aluminiumoxid und SiSiC übertrifft. Mit der Paarung gesinterter SiC gegen gesinterter SiC sind so gute Erfahrungen gemacht und Ergebnisse erzielt worden, dass der SSiC-Werkstoff bei Einsätzen in hermetisch gekapselten Magnet-pumpen nicht mehr wegzudenken ist.

In weniger beanspruchten Systemen werden Gleitringe auch aus Carbonwerkstoffen eingesetzt, insbesondere aus imprägnierten Kohlenstoffmaterialien. Neben den Imprägnier-prozessen (mechanisches Auffüllen der Poren) sind Modifikationen durch chemische Reaktion des Kohlenstoffs mit flüssigem Silicium zu SiC möglich. Eine weitere Möglichkeit ist das Beschichten von Kohlenstoff/Graphit mittels chemischer Gasphasenreaktion (SiO<sub>2</sub>-Dampf auf die Kohlenstoffoberfläche) oder diffusionskontrollierte Reaktion von Si-Metall auf Kohlenstoff, wodurch eine poröse 0,5 – 5 mm dicke SiC-Phase auf der Oberfläche abgeschieden wird. Die offenen Poren können durch eine weitere Imprägnierung mit Kunststoff gefüllt werden. Kohlegraphit wird insbesondere in schmierstofffreien Anwendungen eingesetzt.



SiC beschichteter Graphit (C-SiC)

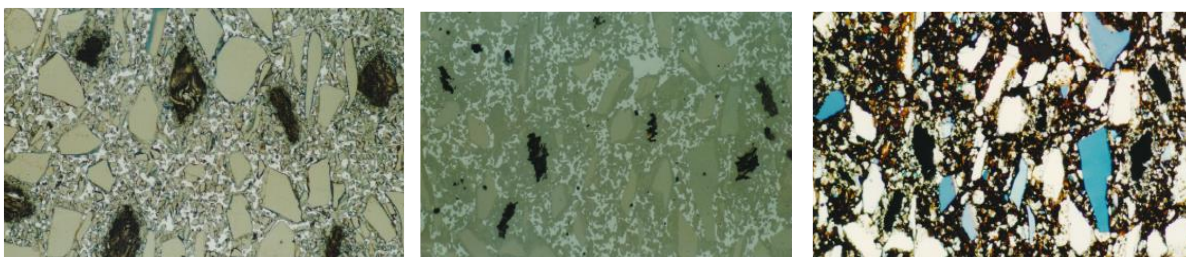


Hülsen aus C-SiC

Technische Daten von C-SiC

Dichte	g/cm <sup>3</sup>	1,95
Biegefestigkeit	Mpa	35
Druckfestigkeit	Mpa	83
E-Modul	GPa	15,9
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	30
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	10 <sup>-6</sup> K	5
Härte Rockwell B		95
Offene Porosität	%	<2,5
Temperaturbeständigkeit	°C	260
Imprägnierung		Kunststoff

Eine weitere Möglichkeit den Trockenlauf, bzw. die Notlaufeigenschaften von SiC (SiSiC und SSiC) zu verbessern ist der Einbau von Poren, in denen das Medium verbleibt, und der Einbau von Graphit. Der Graphit wirkt als Festschmierstoff und überbrückt beim An- und Auslaufen der Lager den sonst stattfindenden Trockenlauf.



C-SiSiC Auflicht 200:1

C-SiSiC modifiziert Auflicht 200:1

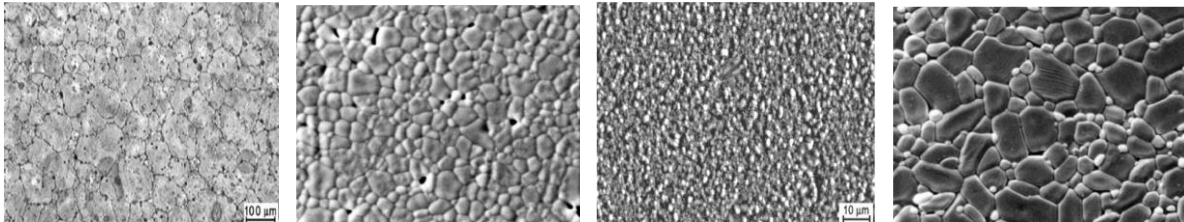
C-SiSiC Dünnschliff Durchlicht 200:1

Die Bilder zeigen neben dem Primär-SiC und Sekundär-SiC (grau) und freiem Si (weiß) auch das eingelagerte Graphit (schwarz) sowie im Dünnschliff (blau).

Graphit weist eine sehr gute Thermoschockbeständigkeit auf. Auch die Wärmeleitfähigkeit liegt im Bereich der Metalle. Die Bruchzähigkeit ist dagegen sehr niedrig. Wichtig ist auch, dass die mechanischen Eigenschaften wegen der Gitterstruktur des Graphits richtungsabhängig sind. All dies muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Kohlenstoffprodukte sind unlöslich, nicht schmelzbar und beständig gegen nahezu allen Medien der organischen Chemie und zeichnen sich auch gegen anorganische Medien

wie Laugen, die meisten Säuren und technischen Gase als höchst beständig aus. Bei imprägnierten Graphiten ist die Korrosionsbeständigkeit abhängig vom pH-Wert und hängt auch von der Korrosionsbeständigkeit des verwendeten Kunststoffes ab. Kunstharze sind in sauren Medien korrosionsbeständiger. Der Einsatz von Graphit erfolgt vor allem bei Trocken- und Mischreibung, wobei keine hart-hart Paarungen (C-SiC gegen C-SiC) verwendet werden.

Für Spaltpöfe hat sich die elektrisch nichtleitende Zirkonoxidkeramik ( $ZrO_2$ ) empfohlen, da dieser Werkstoff eine deutlich höhere Festigkeit und Bruchzähigkeit aufweist. Allerdings sind nicht alle  $ZrO_2$ -Qualitäten geeignet, da sie nicht hydrothermalbeständig sind. Die Qualitäten mit den höchsten Festigkeiten, die mit  $Y_2O_3$ -dotierten (Y-PSZ und Y-TZP), haben alle Probleme im Dampf und feuchter Umgebung. Selbst die Zugabe von  $Al_2O_3$  hat nur eine geringe Verbesserung ergeben. So wurde lange Zeit nur das MgO-dotierte  $ZrO_2$  als hydrothermal-stabiler  $ZrO_2$ -Werkstoff als Spalttopfmaterial verwendet. Wegen der geringeren Festigkeit und den Drücken im Spalttopf bis 60 bar und z.T. bis 100 bar sind jedoch größere Wanddicken erforderlich, wodurch wiederum das Magnetfeld geschwächt wird, das für die Leistung der Magnetpumpe verantwortlich ist.



Gefügebild MgO-PSZ

Gefügebild Y-TZP

Gefügebild Y-TZP modifiziert

Gefügebild Y-TZP mit  $Al_2O_3$

Das MgO-dotierte Zirkonoxid ist gegenüber dem  $Y_2O_3$  dotierten Zirkonoxid recht grobkörnig, weist jedoch eine gute Korrosionsbeständigkeit auf und ist auch hydrothermal beständig... Feinkörnigere  $Y_2O_3$ -dotierte Qualitäten haben in der Regel höhere Festigkeiten, sind aber korrosionsanfälliger. Werden sehr feine  $Al_2O_3$ -Partikel (weiß) in geringen Mengen zwischen den  $ZrO_2$  Kristallen (dunkelgrau) eingelagert, wie im Gefügebild Y-TZP zu sehen ist, wird die Bewegungsmöglichkeit der Zirkonoxidkristalle behindert, was zu einer höheren Festigkeit führt. Allerdings wird dadurch die Hydrothermalstabilität etwas aber nicht wesentlich verbessert. Um dieses zu erreichen, muss die Korngrenzenphase zusätzlich verändert werden. Eine Verbesserung wurde nach hausinternen gemeinsamen Versuchen mit unserer indischen Partnerfirma CUMI durch Zusatz eines weiteren Sinteradditivs erreicht. Durch die Co-Stabilisierung mit Ceroxid gelang es ein Y-TZP mit hoher Festigkeit (900 MPa) bei gleichzeitiger Hydrothermalstabilität zu erhalten. Dieser Werkstoff weist auch eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit gegenüber Säuren und Laugen auf.



Spalttöpfe gepresst



Spalttöpfe grün bearbeitet



Spalttopf gesintert und geschliffen

Der Autor dank Herrn Dr. Mathias Woydt von der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung in Berlin) ganz herzlich für die zur Verfügung gestellten aussagekräftigen Schlibfbilder.

## Ingenieurkeramische Werkstoffe von hightech **ceram**<sup>®</sup>

Eigenschaften	Symbole	Einheit	Qualitäten unserer SiC-Werkstoffe			
			htc <sup>®</sup> -SiSiC	htc <sup>®</sup> -SSiC	htc <sup>®</sup> -SSiC-G	htc <sup>®</sup> -SSiC-P
Hauptbestandteile			SiC Si	SiC	SiC Grafit	SiC Poren
Dichte	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	3,05	3,06	>3,02	2,80
Härte	HV10	kg/mm <sup>2</sup>	2.000	2.800	2.500	2.400
mittlere Korngröße	d	$\mu\text{m}$	10/5	bimodal	bimodal	5
Biegefestigkeit	$\sigma$	MPa	360	400	230	225
Druckfestigkeit	$\sigma$	MPa	1.200	2.900	2.500	2.000
E-Modul	E	GPa	380	395	390	350
Poisson-Zahl	$\nu$	-	0,20	0,15	0,16	0,17
Bruchzähigkeit	$K_{Ic}$	MPa m <sup>1/2</sup>	4,0	3,5	3,2	3,2
Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha$	10 <sup>-6</sup> K	4,2	5,0	4,1	4,0
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	W/mK	110	110	110	90
Thermoschock	Tc	°C	138	163	124	133

Eigenschaften	Symbole	Einheit	Qualitäten unserer ZrO <sub>2</sub> -Werkstoffe				
			htc <sup>®</sup> -MgO-PSZ	htc <sup>®</sup> -YPSZ	htc <sup>®</sup> -PSZA	htc <sup>®</sup> -YTZP	htc <sup>®</sup> -CeO-YTZP
Hauptbestandteile			ZrO <sub>2</sub> MgO	ZrO <sub>2</sub> Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub> Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Dichte	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	5,7	6,05	5,50	6,07	5,41
Härte	HV10	kg/mm <sup>2</sup>	1.240	1.400	1.450	1.300	1.350
mittlere Korngröße	d	$\mu\text{m}$	20	1,0	0,4	0,4	0,6
Biegefestigkeit	$\sigma$	MPa	650	800	1.800	1.200	900
Druckfestigkeit	$\sigma$	MPa	2.000	2.000	2.300	2.000	1.900
E-Modul	E	GPa	200	205	260	200	200
Poisson-Zahl	$\nu$	-	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2
Bruchzähigkeit	$K_{Ic}$	MPa m <sup>1/2</sup>	8,0	6,0	9,0	12,0	9,0
Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha$	10 <sup>-6</sup> K	10	10	9,5	11	10
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	W/mK	3	2	3	2,5	3
Thermoschock	Tc	°C	129	129	155	140	180

Eigenschaften	Symbole	Einheit	Qualitäten unserer Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Werkstoffe			
			htc <sup>®</sup> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -92%	htc <sup>®</sup> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -99,5%	htc <sup>®</sup> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -99,7%	htc <sup>®</sup> -ZTA
Hauptbestandteile			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ZrO <sub>2</sub>
Dichte	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	3,65	3,92	3,94	4,00
Härte	HV10	kg/mm <sup>2</sup>	>1500	>1500	>1900	1800
mittlere Korngröße	d	$\mu\text{m}$	2-8	2-10	2-5	1,5
Biegefestigkeit	$\sigma$	MPa	>300	>350	>400	500
Druckfestigkeit	$\sigma$	MPa	2.350	2.500	2.500	3.000
E-Modul	E	GPa	290	>350	>380	360
Poisson-Zahl	$\nu$	-	0,18	0,20	0,20	0,22
Bruchzähigkeit	$K_{Ic}$	MPa m <sup>1/2</sup>	4,0	4,0	4,2	6,0
Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha$	10 <sup>-6</sup> K	8,2	8,5	8,5	7,8
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	W/mK	22	28	30	23
Thermoschock	Tc	°C	72	129	115	145



Eigenschaften	Symbole	Einheit	Qualitäten unserer Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -Werkstoffe				
			htc <sup>®</sup> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SN-MgO-1	htc <sup>®</sup> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SN-Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1	htc <sup>®</sup> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SN-Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2	htc <sup>®</sup> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SN-Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3	htc <sup>®</sup> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SN-Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -4
Hauptbestandteile			Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> MgO HPSN	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> HPSN	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> GPSN	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> GPSN	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> MgO GPSN
Dichte	ρ	g/cm <sup>3</sup>	3,2	3,2	3,3	3,2	3,2
Härte	HV10	kg/mm <sup>2</sup>	1.550	1.600	1.600	1.600	1.620
mittlere Korngröße	d	µm	1/7	1/8	1/8	1/7	1/8
Biegefestigkeit	σ	MPa	750	760	800	900	1.200
Druckfestigkeit	σ	MPa	3.000	3.000	2.500	3.500	3.000
E-Modul	E	GPa	320	320	320	320	320
Poisson-Zahl	ν	-	0,29	0,28	0,28	0,28	0,29
Bruchzähigkeit	K <sub>Ic</sub>	MPa m <sup>1/2</sup>	7,0	8,0	8,0	8,1	8,0
Wärmeausdehnungskoeffizient	α	10 <sup>-5</sup> K	3,5	3,2	3,2	3,2	3,2
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/mK	35	30	32	30	47
Thermoschockparameter R <sub>1</sub>	Tc	°C	495	534	500	633	515

Eigenschaften	Symbole	Einheit	Qualitäten unserer BN-Werkstoffe					
			htc <sup>®</sup> - BN-HiP HDBN	htc <sup>®</sup> - BN-R ASBN	htc <sup>®</sup> - BN-S CDBN	htc <sup>®</sup> - BN-SC SCBN	htc <sup>®</sup> - BN-Z SOBN	htc <sup>®</sup> - BN SBN
Hauptbestandteile			0,5%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	>15%SiC >3%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >5% SiC <40%ZrO <sub>2</sub>	>2%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Dichte	ρ	g/cm <sup>3</sup>	2,05	1,90	2,05	2,24	2,92	2,10
Härte	HV0,1	GPa	2,6	1,6	1,8	2,8	4,5	2,2
Biegefestigkeit	σ	MPa	32	18/15	50/35	90/50	120/64	75/45
E-Modul	E	GPa	23	14/11	30/25	80/27	82/34	45/30
Wärmeausdehnungskoeffizient	α	10 <sup>-5</sup> K	4,4	1,0/2,0	2,2/7,5	1,5/6,5	3,5/8,5	1,5/5,5
Wärmeleitfähigkeit bei 20°C	λ	W/mK	50	28/19	65/45	46/20	38/20	48/43
Wärmeleitfähigkeit bei 1000°C	λ	W/mK	20	16/12	15/10	30/16	25/13	28/24
Spezifische Wärme bei 20°C		J/gK	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8
Spezif. Widerstand bei 20°C		Ω cm	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>12</sup>	>10 <sup>12</sup>
Max. Einsatztemperatur an Luft		°C	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
in inerter Atmosphäre		°C	2.400	2.400	2.400	2.000	2.000	2.000

Die angegebenen Daten sind typische, an Proben bestimmte Werte. Sämtliche Angaben entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse und können ohne Ankündigung geändert werden. Etwa bestehende Schutzrechte Dritter sind zu berücksichtigen.

Autor: Dr. Ing. Detlef Steinmann