

## Wenn konventionelle Werkstoffe streiken Konstruktionen aus technischer Keramik

Von Ing. (grad.) Hermann Bertsch, Dipl.-Ing. (FH) Klaus Wolf  
Überarbeitung 2004

Die Forderungen der Techniker nach höheren Leistungen, längeren Standzeiten und geringeren Wartungskosten sind derart gestiegen, dass die Grenzen der konventionellen Maschinenbau-Werkstoffe häufig überschritten werden. Hier eröffnen keramische Werkstoffe dem Konstrukteur neue Perspektiven zur Problemlösung.

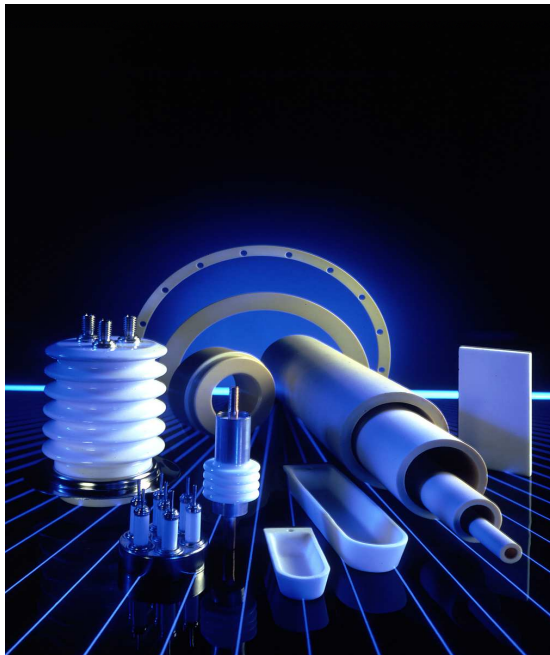
Stellvertretend für vielfältige Keramikanwendungen in den einzelnen Industriezweigen werden nachfolgend aus Maschinenbau und Chemie eingehend einige Einsatzbeispiele dargestellt und die erforderlichen Konstruktionskriterien erläutert. Eigenschaften der Keramik wie

- hohe mechanische Festigkeiten, auch bei hohen Temperaturen
- gute Temperaturwechselbeständigkeit
- ausgezeichnete chemische Beständigkeit
- hohe Härte und Verschleißfestigkeit
- niedriges spezifisches Gewicht

geben dem Konstrukteur die Möglichkeit zum Bau von Maschinenelementen, die auch unter extremen Bedingungen ihre Aufgabe erfüllen, denen konventionelle Werkstoffe nicht mehr standhalten.

### Keramik praktisch und theoretisch begreifen

Neben der seit langem bekannten und für viele Bereiche unentbehrlichen Aluminiumoxidkeramik ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) haben in neuerer Zeit unter den oxidischen Keramiken die Entwicklung von Zirkonoxid ( $\text{ZrO}_2$ ), sowie bei den nichtoxidischen Keramiken die Entwicklung von Siliziumkarbid ( $\text{SiC}$ ) und Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) als Ingenieurkeramiken



wesentliche Schritte nach vorne gemacht.

Hält man sich den Entstehungszeitraum des in der Metallverarbeitung bekannten umfangreichen »Stahlschlüssel« vor Augen, steht man mit den derzeitigen Keramikentwicklungen erst am Anfang. Das heutige Wissen über Keramik stellt erst einen kleinen Abschnitt auf dem Weg zur »berechenbaren« Keramik dar. Wissenschaftler aus Industrie und Forschung arbeiten jedoch mit Hochdruck an diesen Aufgaben.

Die Auswertung aller durch Versuche gewonnenen Erfahrungen sowie eine einheitliche Normgebung und exakt ermittelte Berechnungsgrundlagen sind eine notwendige Voraussetzung dafür, Keramiken prak-

tisch und theoretisch in den Griff zu bekommen. Man kann heute schon mittels „finiter Elemente“ Keramiken im belasteten Zustand mit sehr hoher Genauigkeit berechnen. Dies setzt jedoch das Wissen um alle Einflußgrößen voraus.

Auf Grund der geringen Dichte des Werkstoffes sind Keramikbauteile verglichen mit Stahl wesentlich leichter; statistische und dynamische Kräfte sind geringer. Dies bedeutet beispielsweise bei großen bewegten Bauteilen, dass man den Antrieb wesentlich kleiner dimensionieren kann.

Die Tatsache, dass Keramik keine offene Porosität aufweist und aus einem relativ feinkristallinen Gefüge besteht, führt bei der Bearbeitung zu hochglänzenden Oberflächen mit Ra-Werten bis zu  $0,01\mu$ .

Die außergewöhnlich hohe Härte (fast diamanthart) ist eine der Eigenschaften, die für die extreme Verschleißbeständigkeit der Keramiken verantwortlich ist.

Die Druckfestigkeit ist eine der Kriterien, die die Überlegenheit anderen Werkstoffen gegenüber verdeutlicht. Sofern die Möglichkeit besteht, sollte man die hohe Druckfestigkeit der Keramiken bei den Konstruktionen ausnutzen, das heißt auftretende Zug-, Biege- oder Torsionskräfte in Bauteile durch Vorspannung der Keramik mittels

Drucks (zum Beispiel Einschrumpfen) kompensieren. Speziell bei den neueren Keramiken wurden Festigkeit bei Zug- oder Biegebeanspruchungen entwickelt, die die Werte von Stahl nahezu erreichen.

**Krasse Temperaturwechsel vermeiden**

Krasse Temperaturwechsel, die beispielsweise beim Abschrecken in Flüssigkeiten auftreten, sind bei keramischen Bauteilen zu vermeiden. Der zulässige Temperaturwechsel ist von der Bauteilgeometrie abhängig.

Geometrisch einfache Bauteile, zum Beispiel aus Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> oder ZrO<sub>2</sub>, haben schon problemlos Temperaturschocks von Δt 500 °C überstanden.

Neben der Biegebruchfestigkeit kommen heute auch der kritische Spannungsintensitätsfaktor K<sub>ic</sub> sowie die sogenannte Weibull-Statistik bei der Berechnung keramischer Bauteile zur Anwendung.

Ein für die Konstruktion wichtiges Kriterium ist der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient α in der Verbindungstechnik unter Einfluß von Temperatur. Speziell in der Motorentechnik hat sich zum Beispiel Zirkonoxid auf Grund seines relativ hohen Ausdehnungskoeffizienten als

Verbundpartner mit Metallen beim Einschrumpfen und Klemmen bestens bewährt. Die gute chemische Beständigkeit der Keramiken gegen Säuren, Laugen und Schmelzen kommen beim Einsatz im Pumpenbau aber auch in der Metallurgie zum Tragen. Der hohe elektrische Widerstand der Keramik (außer SiC und bei hohen Temperaturen ZrO<sub>2</sub>) wird von der Elektrotechnik für Isolatoren ausgenutzt.

Bauteile für die chemische Industrie und den Maschinenbau werden vorwiegend durch Trockenpressen, isostatisches Pressen sowie einer nachfolgenden Weißbearbeitung hergestellt. Entscheidend für die Auswahl des Verfahrens ist die Bauteilgröße, die Geometrie und die anzufertigende Stückzahl.

Präzisionsteile mit engen Toleranzen, die heute für viele Anwendungen benötigt werden, müssen durch Nacharbeit nach dem Sintern mit Diamantwerkzeugen hergestellt werden. Hierfür werden die von der Metallarbeit her bekannten Bearbeitungsschritte – Trennen, Schleifen, Läppen, Honen oder Polieren – in modifizierten Verfahren eingesetzt.

**Dichtungen aus Keramik**

Die axiale Gleitringdichtung hat in den vergangenen Jahren als Dichtelement für rotierende



Bauteile aus den Werkstoffen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und ZrO<sub>2</sub>, beispielsweise in modernen Pumpen und Rührwerken garantieren eine lange Lebensdauer und geringe Leckage. Bild: Friatec AG

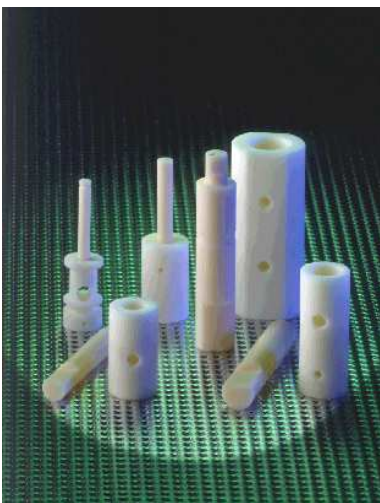
Wellen die Stopfbüchse abgelöst. In modernen Pumpen und Rührwerken garantiert die Gleitringdichtung eine lange Lebensdauer und geringe Leckagen. Keramikgleitringe werden heute vorwiegend aus den Werkstoffen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und SiC hergestellt.

Eigenschaft	Einheit	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		ZrO <sub>2</sub>			SiC	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
		F99D	F99,7	FZM	FZY	FZM/K	SiC 198	HP 79
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	3,7 - 3,8	3,9 - 3,95	5,5 - 5,8	5,5 - 5,8	6,0 - 6,1	3,1	3,2
Härte (Knoop, 100g)	N/mm <sup>2</sup>	20 000	23 000	17 000	17 000	18 000	21 000	17 000
Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	3000	3500	1800	2000	2200	1200	3000
Biegebruchfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	300	350	450	350	800	350	750
Elastizitätsmodul	GP a	350	380	180	165	200	330	320
WEIBULL-Modul	m	>10	>10	>20	-	>15	>10	>20
Poisson-Zahl	-	0,22	0,22	0,3	0,3	0,3	0,2	0,26
offene Porosität	%	0	0	0	0	0	>1	0
Max. Einsatztemperatur	°C	1700	1950	900	900	1500	1400	1400
Ausdehnungskoeffizient	10 <sup>-6</sup> /K	8,5	8,5	10	10	10,5	4,4	3,2
Spezifische Wärme	J/kgK	900	900	400	400	400	900	800
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	25	30	2,5	2,5	2,5	90	40
Spez. Widerstand	Ohm cm	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>14</sup>
Farbe		weiß	weiß	gelb	creme	weiß	schwarz	schwarz

Alle Werte beziehen sich auf eine Temperatur von 20°C

Diese Werkstoffe haben gegenüber herkömmlichen Materialien den Vorteil der hohen chemischen Beständigkeit gegen alle Chemikalien organischer und anorganischer Art.

Die Befestigung der Ringe erfolgt mittels Klemmen, Einpressen sowie loser Führungen mit Verdrehsicherung. Da besondere Bearbeitungen oder Oberflächengüten meistens nur an den Dichtflächen gefordert sind (Ra-Wert 0,1 bis 0,3 $\mu$ , Ebenheit 0,0006mm), können diese Teile wirtschaftlich gefertigt werden. Neben den bekannten DIN-Standardringen werden für hohe Anforderungen Spezialabmessungen nach Kundenwunsch gefertigt. Präzisionskugeln aus Keramik werden heute beispielsweise als Ventilkugeln, in Vakuumpumpen, in Kugellagern, zur Präzisionskalibrierung, zur Isolation und als Schaltkugeln in Kugelhähnen eingesetzt. Die Kugeln sind antimagnetisch und zeichnen sich insbesondere durch hohe chemische Beständigkeit aus. Durch die hochglanzpolierte Oberfläche wird der Reibungskoeffizient auf einen minimalen Wert reduziert. Durchmesser toleranz, Sphärität und Oberflächenrauigkeit liegen bei kleineren Kugeln im  $\mu$ -Bereich, dadurch ergibt sich eine einwandfreie Abdichtung im Ventilsystem. Durch die geringe Dichte der Keramikmaterialien



Kolben und Plunger aus Keramik.

(ca.  $\frac{1}{2}$  von Stahl;  $\frac{1}{4}$  von Hartmetall) sprechen diese Kugeln

im hydraulischen System wesentlich schneller an. Kolben und Plunger aus Keramik werden in Dosier- und Hochdruckpumpen überall dort eingesetzt, wo infolge auftretender Korrosions- und Abrasionsprobleme konventionelle Werkstoffe den Anforderungen nicht genügen. Die Abdichtung zwischen Kolben und Gehäuse erfolgt durch Stopfbuchsen oder Manschetendichtungen. Um die Reibung und den Verschleiß an der Dichtung möglichst gering zu halten, werden die Oberflächen auf einen RA-Wert  $\leq 0,3\mu$  poliert. Die Befestigung der Kolben erfolgt bei großen Durchmessern durch Einkleben oder Einkitten einer Metallhalterung. Bei kleineren Durchmessern wird die Keramik in die Metallhalterung eingeschrumpft. Ein radiales oder axiales Spannen ist ebenfalls möglich.

#### Lager brauchen Laufruhe

Bei den meisten Anwendungen dient das Fördermedium gleichzeitig als Schmiermittel. Stark korrodierende Medien (Säure, Lauge) oder abrasive Feststoffe im Medium (unlösliche Stoffe wie Sand, Kalk, Rost, Salz usw.) können der Keramik, im Gegensatz zu Metallen, nichts anhaben.

Wellenschutzhülsen werden zum Schutz gegen Einlaufen der Dichtung eingesetzt. Die Abdichtung zur Welle erfolgt durch Flachdichtungen und axiales Verspannen. Gleitlager werden vorzugsweise eingepreßt oder eingeschrumpft. Eine zusätzliche Verdrehsicherung mittels eines Stiftes ist möglich.

Um bei Lagern eine genügende Laufruhe zu erzielen und bei Wellenschutzhülsen den Packungs- oder Manschettenverschleiß zu reduzieren, muss die Gleitoberfläche feinstbearbeitet sein. Die Trockenlaufeigenschaften sind jedoch bei  $\text{Al}_2\text{O}_3$  begrenzt;  $\text{ZrO}_2$  hat relativ gute Notlaufeigenschaften.

Bei stark aggressiven Medien im Zusammenhang mit hohen Temperaturen bis 700 °C haben sich heute Kugellager aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$  bewährt. Trotz fehlender Schmierung, hohen Drehzahlen und Belastungen haben diese Lager in der Praxis eine hervorragende Standzeit.

#### Umfangreiche Platte keramischer Bauteile

Zur umfangreichen Palette keramischer Bauteile gehören noch Düsen, Führungselemente sowie eine Vielzahl Einzelanwendungen, die nur schwer unter einem Oberbegriff zusammenzufassen sind. Zur Befestigung der Keramik mit einem Verbundpartner können mit Ausnahme von Schweißen fast alle bekannten lösbaren und unlösbaren Verbindungselemente in modifizierter Ausführung eingesetzt werden.

Die Entscheidung zum Einsatz von Keramik fällt dem Anwender heute immer leichter, da auf Grund der hervorragenden physikalischen Eigenschaften der Keramiken die Lebensdauer und somit der Wert seines Endproduktes gesteigert wird.

*Wurde veröffentlicht in: Konstruktion & Elektronik; Mai 1985.*