

8. Weitere Aufsätze

- **Weitere Fortschritte durch Einsatz von SiC-Keramiken in der Hochtemperaturtechnik**
- **Härte zeigen**
- **Konstruieren mit Keramik: Ohne Ecken und Kanten**

Weitere Fortschritte durch Einsatz von SiC-Keramiken in der Hochtemperaturtechnik

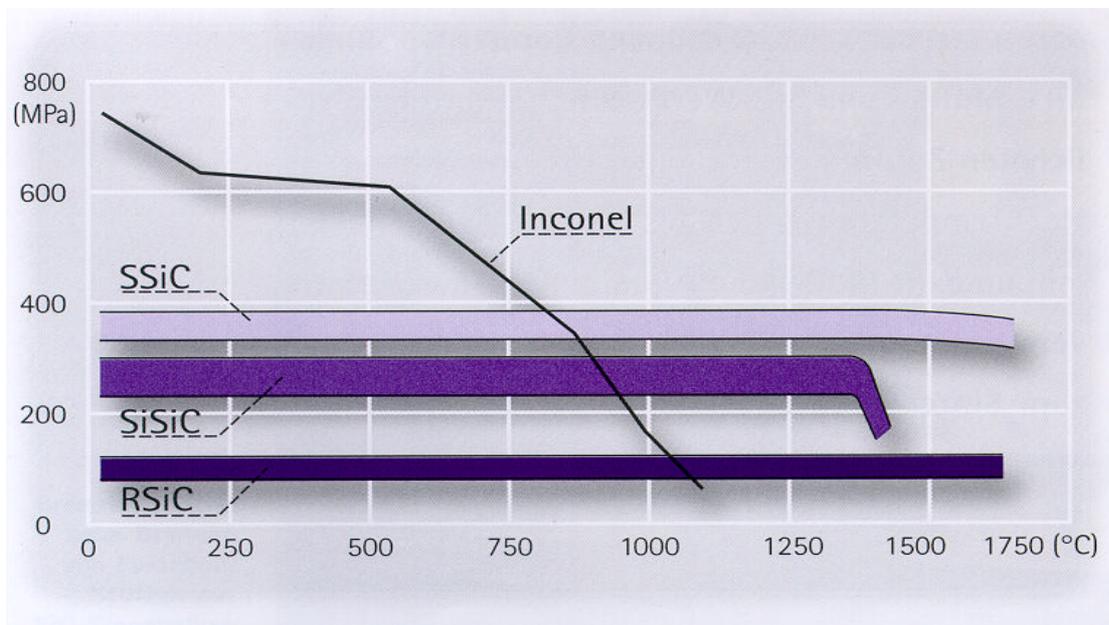
Neue "Halsic-RX"-Keramik trotz der Hochtemperaturoxidation

Dr.-Ing. Andreas Sonntag

W. Haldenwanger Technische Keramik GmbH & Co. KG

Berlin

Siliciumcarbidkeramiken (SiC) zeichnen sich prinzipiell durch sehr hohe mechanische Belastbarkeiten aus - eine Eigenschaft, die im Grunde für technische Keramiken nichts außergewöhnliches darstellt. Das Besondere an diesen SiC-Hochleistungskeramiken ist aber, daß sie ihr hohes Festigkeitspotential bis zu sehr hohen Einsatztemperaturen beibehalten und dabei absolut formstabil bleiben (siehe Grafik).



Bauteile aus SiC-Keramiken in Form von Balken, Platten, Rollen usw. sind daher für Hochtemperaturkonstruktionen wie z.B. Brenngestelle zum Brennen von Porzellan, der ideale Konstruktionswerkstoff: Mechanisch hochbelastete Bauteile (Tragbalken, Traversen etc.) sind selbst nach über 1000 Hochtemperaturdurchläufen in einem typischen Porzellanschnellbrand bei 1420°C noch genauso gerade wie vor dem ersten Brand - dies beweist die hohe Zuverlässigkeit der SiC-Keramiken.

Diese typischen Eigenschaften der SiC-Keramiken bringt der synthetisch hergestellte SiC-Kristall mit sich: hohe Festigkeit, extreme Härte, niedrige Wärmeausdehnung, hohe Wärmeleitfähigkeit, hohe Steifigkeit (Elastizitätsmodul) und eben Hochtemperaturbeständigkeit. Diese synthetisch hergestellten SiC-Kristalle finden u. a. aufgrund ihrer extremen Härte eine starke Verbreitung im Bereich der Schleifmittelindustrie. Die Herstellung keramischer Bauteile aus diesen SiC-Kristallen kann durch unterschiedliche, aber sehr aufwendige Techniken realisiert werden. Je nach Herstellungstechnik können aus dem anfänglich als SiC-Ausgangspulver unterschiedliche SiC-Keramiken mit individuellen Eigenschaften hergestellt werden (Tabelle).

In den letzten 15 Jahren gelang es, entscheidende Fortschritte in der großtechnischen Herstellung und im entsprechenden Einsatz dieser SiC-Keramiken zu machen. So konnten die Eigenschaften der anfänglichen kleinen Probengeometrien auf großformatige Konstruktionsbauteile von z.B. Balkengeometrien von 80x60x3000mm realisiert und erfolgreich eingesetzt werden. Die Folge ist, daß die klassischen Brennprozesse von Massenprodukten wie z.B. Porzellan, Sanitärwaren, Wand- und Bodenfliesen, Ziegelprodukte usw. drastisch verkürzt werden konnten: Man war in der Lage, sehr leichte aber äußerst stabile Brenngestellaufbauten (sog. Brennhilfsmittel) oder auch Rollen aus SiC-Keramiken zu verwenden. Neue Ofenkonstruktionen mit wiederum neuen Wärmedämmmaterialien konnten umgesetzt werden, so daß die sonst typischen Brennzyklen für z.B. Porzellan von 60h auf 4-6h reduziert werden konnten - ein gewaltiges Energieeinsparpotential ist realisiert worden. Darüber hinaus ist man mittels der neuen SiC-Brennhilfsmittel in der Lage, deren hohe Festigkeitsniveau, die hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit und vor allem präzise Formstabilität dahingehend zu nutzen, daß immer filigranere Brenngestellaufbauten mit engen Toleranzen realisiert werden konnten: Eine vollautomatische Be- und Entladetechnik im Brennprozeßablauf ist damit ermöglicht worden. Dieser Fortschritt und die damit selbstverständlich verbundenen Kosteneinsparungen in der Herstellung von z.B. Geschirrporzellan oder Dachziegel ist maßgeblich von der Zuverlässigkeit und somit Lebensdauer der SiC-Keramiken abhängig. Gerade hier konnte durch eine interne Werkstoffneuentwicklung bei der Firma W. Haldenwanger Technische Keramik in Waldkraiburg der SiC-Werkstoff Halsic-RX erfolgreich in den Markt eingeführt werden. Das neue Halsic-RX, das auf der Basis des sog. rekristallisierten SiC hergestellt wird, zeichnet sich durch eine mindestens 2- bis 4-fach erhöhte Lebensdauer im zyklischen Hochtemperatureinsatz für den Porzellanschnellbrand aus. Während die klassischen SiC Bauteile in Form von Balken oder Platten nach ca. 1000 Schnellbrandzyklen aufgrund fortgeschrittener Hochtemperaturoxidation ausgewechselt

werden müssen und damit natürlich auch einen erheblichen Kostenanteil in der Instandhaltung der Brennlinie darstellen, so scheint das neue Halsic-RX der Hochtemperaturoxidation förmlich zu trotzen: Das hohe Festigkeitsniveau bleibt selbst nach 3-facher Zyklenzahl vollständig erhalten, - bis dato ist noch keines der neuen Halsic-RX Bauteile im Hochtemperatureinsatz ausgefallen.

Die damit verbundenen Kosteneinsparungen beim Kunden, aber auch die langlebigere Zuverlässigkeit durch den Einsatz des neuen Halsic-RX der Fa. W. Haldenwanger kommen unmittelbar dem Kunden als Anwender zu Gute und sind als entscheidender Fortschritt für einen weiteren erfolgreichen Einsatz technischer Keramik zu sehen. Das Anwendungspotential von Technischer Keramik für Hochtemperaturapplikationen ist gewiß noch nicht ausgeschöpft. Sie werden stetig weiterentwickelt und mit dem Beweis ihrer Zuverlässigkeit und vielfältigen Einsatzmöglichkeit haben Konstrukteure neue Werkstoffvarianten zur Verfügung, die bei einem gezielten konstruktiv "keramikgerechten" Einsatz bisher nicht realisierte Konzepte Wirklichkeit werden lassen können.

		Halsic-R	Halsic-RX	Halsic-I	Halsic-S
Typ		RSIC rekristallisiert	RSIC rekristallisiert, chemisch dotiert	SISIC rekationsgebunden und siliciuminfiltriert	SSIC drucklos gesintert
Phasenanteile	Vol.-%	SiC:≥99	SiC≥99 ¹	SiC:88-92 Si _{met.} : 12-8	SiC:≥99
Rohdichte _{20°C}	g/cm ³	2,7	2,7	3,1	3,1
Wasseraufnahmefähigkeit	Gew.-%	5	5	≥0,2	≥0,2
Biegefestigkeit 20°C²	MPa	80-100	80-100	240-280	350-400
Biegefestigkeit 1300°C³	MPa	90-110	90-110	250-300	
Wärmeausdehnung _{20-1000°C, linear}	10 ⁻⁶ K ⁻¹	4,5	4,5	4,3	5,0
Wärmeleitfähigkeit 20°C⁴	W/mK				
Wärmeleitfähigkeit 1000°C⁴	W/mK				
Elastizitätsmodul _{statisch, 20°C}	GPa	280	280	370	420 _{dyn}
Temperaturwechselbeständigkeit	-	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
max. Anwendungstemperatur⁵	°C	ca 1000 ⁶ ca. 2000 ⁷	ca. 1600 ⁶	ca. 1350	ca. 1750

physikalische Kenndaten von RSIC bzw. RX-SiC(chem. dotiert), SISIC und SSIC

¹ inklusive chemische Dotierungselemente

² 4-Punktbiegefestigkeiten

³ 3-Punktbiegefestigkeiten

⁴ Laserflashmethode

⁵ abhängig von mechanischer Belastung und Atmosphäre

⁶ in oxidierender Atmosphäre

⁷ in Inertgasatmosphäre

Härte zeigen

von Dipl.-Ing. Martin Hartmann*

Keramische Werkstoffe sind hart im Nehmen. Sie sind verschleißfest, mechanisch und thermisch stabil und zudem außerordentlich beständig gegenüber fast allen Säuren und Laugen. Mit diesen Eigenschaften sind sie vielen Werkstoffen überlegen und daher besonders für Anwendungen in der Chemie die Wahl Nr. 1.

Im vergangenen Jahr wurden in Deutschland¹ rund 46.000 Tonnen technische Keramik hergestellt, das waren acht Prozent mehr als im Jahr zuvor. Dabei lag der Umsatz bei 800 Millionen Mark - mit steigender Tendenz. Obwohl Metalle und Kunststoffe seit langem in der Werkstoffszene etabliert sind, entwickelt sich die technische Keramik zunehmend zur leistungsstarken Alternative. Insbesondere Aluminiumoxid gehört mittlerweile zu den weit verbreiteten Werkstoffen. Dies ist einleuchtend, glänzt Aluminiumoxid doch durch seinen angemessenen Kilopreis, der auf vergleichsweise niedrige Rohstoffkosten und auf die relativ "einfache" Fertigungstechnologie zurückzuführen ist. Daher wird Aluminiumoxid-Keramik vor allem bei großen Flächen, wie die Auskleidung von Rutschen, Mühlen und Trichtern eingesetzt. Zirkonoxid, das eine außergewöhnlich hohe Festigkeit besitzt, hat einen Anteil von sieben Prozent bei den Keramikwerkstoffen. Siliciumcarbid, das schon lange Zeit als Brennhilfsmittel in der Feuerfestindustrie und der Feinkeramischen Industrie verwendet wird, kommt als Konstruktionswerkstoff mit gutem Erfolg zu Einsatz. Dieser Werkstoff besitzt ausgezeichnete Gleit- und Verschleißigenschaften. Daher ist Siliciumcarbid geradezu prädestiniert für Lager in Gleitringdichtungen von Pumpen und Rührwerken.

Im Pumpenbau bewährt

Im Pumpenbau stellt Keramik schon seit längerem seine positiven Eigenschaften unter Beweis. So schützt Keramik im Gehäuse von Kreiselpumpen vor Verschleiß, gleichzeitig wird der Werkstoff zur Lagerung und Abdichtung von Wellen eingesetzt. Speziell Siliciumcarbid war wegen seiner hohen Verschleißfestigkeit, der guten thermischen Leitfähigkeit und der

¹ Lt. Statistik des Verbandes der Keramischen Industrie e.V.

chemischen Beständigkeit in vielen Fällen gegenüber Metall die bessere Alternative. Hervorzuheben ist der Einsatz in Gleitringdichtungen. Eine der wichtigsten Anforderungen an eine Gleitringdichtung ist die geringe Leckage. Dieses Kriterium erreicht man über einen definierten Dichtspalt. Wegen der geringen Reibung und der hohen thermischen Leitfähigkeit der Keramik begrenzt man so von vornherein die Wärmeentwicklung im Dichtspalt. Durch die geringe thermische Dehnung und dem hohen Elastizitätsmodul entstehen nur geringe Verformungen. Der Dichtspalt verändert sich somit auch bei hohen Temperaturen kaum. Gegen eventuell vorhandene Feststoffpartikel im Schmiermedium sind keramische Werkstoffe ebenfalls immun: Da Siliciumcarbid sehr hart ist, können solche abrasive Verunreinigungen keine Schäden verursachen. Das gleiche gilt für den Betrieb in korrosiven Medien, wobei hier das drucklos gesinterte Siliciumcarbid in starken Laugen und Flußsäure den Werkstoffen mit freiem Silicium (SiSiC und SiSiC-C) vorzuziehen ist. Bei sogenannten Hart-Hart-Paarungen bestehen beide Dichtungen aus Siliciumcarbid. Bei Dichtungen, die zeitweise oder ständig ohne Flüssigschmierung betrieben werden, verringert ein graphithaltiger Ring, der gegen den Gleitring aus Siliciumcarbid läuft, die Reibung. Bei Mischreibung haben sich als Gegenringmaterialien Siliciumcarbid-Graphit-Verbünde und bei Trockenlauf Kohlegraphit (Hart-Weich-Paarung) bewährt. Aus den gleichen Überlegungen greift man auch in Rührwerken immer häufiger auf Gleitringdichtungen aus Keramik zurück.

Keramische Plunger und Kolben für Hochdruck- und Dosierpumpen, die aggressive Medien fördern, stehen ebenfalls ganz oben auf der Verwendungsliste der technischen Keramik. Hier überzeugen nicht nur die positiven Gleiteigenschaften, sondern auch die Formgenauigkeit und die Oberflächengüte. Beides wirkt positiv auf die Laufruhe und trägt zu einer hohen Funktionssicherheit und einer langen Standfestigkeit (sprich Lebensdauer) bei.

Keramik für Exzentrerschneckenpumpen

In Hinsicht auf die Lebenszykluskosten (Life-cycle-Kosten) sind für Exzentrerschneckenpumpen besonders Rotoren aus massivem SiC interessant. Exzentrerschneckenpumpen fördern sowohl sensible als auch abrasive Medien. Bisher wurden die Rotoren aus Stählen - von ST 37 bis Hastelloy - hergestellt, die in einer abrasiven Umgebung entsprechend schnell in Mitleidenschaft gezogen wurden. In diesem Fall half meist nur noch der komplette Austausch von Rotor und Stator. Mit keramischen Werkstoffen läßt sich die Standzeit erheblich verlängern. Keramik besitzt gegenüber Stahl eine deutlich höhere Härte (ca. 2800

HV); Hartmetall weist eine Härte von 2000 HV auf, gehärteter Stahl sogar nur 500 HV. Zugleich ist Keramik leicht, weil ihre Dichte nur 40 Prozent der von Stahl besitzt, und zusätzlich chemisch äußerst beständig ist. Überdies sorgt die relativ glatte Oberfläche ($R_a = 2 \mu\text{m}$) für einen geringeren Verschleiß des Stators. Obwohl Keramik in etwa doppelt soviel wie Hastelloy kostet, stimmt die Gesamtkalkulation trotzdem, weist ein Rotor aus Keramik doch eine deutlich höhere Standzeit auf. Berücksichtigt man noch die Ausfallzeiten für Reparaturen und Ausbau, wird schnell erkennbar, daß Keramik hier der kostengünstigere Werkstoff ist.

Keramik als Verschleißschutz

In Schüttgutanlagen ist Verschleiß an der Tagesordnung. Rinnen und Rutschen, Übergabestellen, Trichter, Zyklone und Rührwerke sowie Mischer sind nur einige Anlagenteile, die im Industrielltag dem erhöhten Verschleiß und der Korrosion ausgesetzt sind. Auch verschlissene Rohrbögen in pneumatischen oder hydraulischen Transportsystemen sind ein bekanntes Bild. Lange Betriebsstillstandszeiten und Reparaturkosten sind die Folge. Seit etwa 10 bis 15 Jahren ist man daher dazu übergegangen, Anlagen in der Schüttgutindustrie zum Verschleißschutz mit keramischen Materialien auszukleiden. Da meist große Flächen davon betroffen sind, kommt fast ausschließlich das kostengünstige Aluminiumoxid zum Einsatz. Für Rohre mit einem Innendurchmesser bis 200 mm werden isostatisch gepreßte Aluminiumoxidrohre eingebaut. Speziell in den Rohrbögen und Vorverengungen mit ihrer hohen erosiven Belastung und den hier auftretenden Verwirbelungen hat sich die Keramik bewährt. Weniger beanspruchte gerade Rohrsegmente werden aus Kostengründen häufig mit Schmelzbasalt belegt. Große Rohrdurchmesser kleidet man mit angeschrägten Platten oder mit Keilsteinen aus. Um die Handhabung zu erleichtern, gingen die Entwickler eine Allianz mit einem ganz anderen Werkstoff ein: Keramikmosaiken werden in Gummi galvanisiert, die großflächigen Gummimatten lassen sich nun einfach montieren und schützen vor Verschleiß.

Auch in der Vermahlung schätzt man den extrem niedrigen Abrieb sowohl bei der Nach- als auch bei der Trockenmahlung. Daher werden Keramikliner, -einsätze und -rührwerke nicht nur in rotierenden Kugelmöhlen, sondern auch in Vibrations-, Attritor- und Rotationsmöhlen verwendet. In der Lebensmittel- und Kosmetikindustrie werden keramische Auskleidungen und Mahlkugeln ebenfalls bevorzugt, da sie einen minimalen und vor allem einen nichttoxischen Abrieb aufweisen.

Keramik und Sensoren

Immer häufiger werden keramische Werkstoffe für Sensoren verwendet. In der chemischen Industrie sind keramische Sauerstoffsensoren, die aus mit Yttriumoxid stabilisiertem Zirkonoxid bestehen, weit verbreitet. Andererseits kann die Temperaturmessung nicht auf einen keramischen Schutz verzichten, sind die Temperaturfühler doch in der Praxis oft rauen Betriebsbedingungen ausgesetzt. Ein äußeres Rohr schützt die sensiblen metallischen Fühler gegen Druck, Strömung und Korrosion. Keramische Schutzrohre aus Aluminiumoxid, in Sonderfällen auch aus Siliciumcarbid, werden vor allem bei Messungen im Hochtemperaturbereich eingesetzt – hier versagen metallische Werkstoffe. Wegen ihrer Korrosionsbeständigkeit schützen die keramischen Werkstoffe zunehmend auch bei in der Messung niedriger Temperaturen.

Anwendungen in der Hochtemperaturtechnik

Siliciumkarbidkeramiken zeichnen sich prinzipiell durch sehr hohe mechanische Belastbarkeit aus. Ihr Festigkeitspotential halten sie auch bei sehr hohen Einsatztemperaturen (bis 1700°C) – sie bleiben also formstabil. Dadurch eignen sie sich für viele Konstruktionen im Hochtemperaturbereich. Düsen, aber auch Wärmeaustauscher, die zweifelsohne zu den wichtigen Aggregaten in der chemischen Verfahrenstechnik gehören, sind Beispiele dafür. Gegenüber herkömmlichen Werkstoffen, wie Metall oder Glas, weist ein keramischer Werkstoff noch mehr Vorteile auf. Er widersteht nicht nur höheren Temperaturen, sondern ist zudem korrosionsbeständig.

Bei Wärmetauschern aus dem Werkstoff SiSiC sind über diese Eigenschaften hinaus hohe mechanische Festigkeit und Abrasionsbeständigkeit wichtig. Der große Vorteil: Abgas-temperaturen können bis 1400°C voll ausgenutzt werden. Dagegen müssen bei metallischen Wärmeaustauschern die Abgase mit Kaltluft auf ein weniger kritisches Temperaturniveau gebracht werden. Aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit lassen sich die Verbrennungsabgase zusätzlich unter den Taupunkt abkühlen. Keramische Wärmeträger eignen sich daher nicht nur für den Hochtemperatureinsatz in Feuerungs- und thermischen Nachverbrennungsanlagen, sondern auch für Anwendungsfälle, bei denen besonders Korrosions- **und** Abrasionsbeständigkeit gefordert sind.

Bei vielen weiteren Anwendungen im Hochtemperaturbereich eignen sich keramische Werkstoffe. Man greift daher für Ventilsitze, Filter oder Ventilatoren auf Siliciumnitrid, Siliciumcarbid und Aluminiumoxid zurück.

Ausblick: Weiter hohes Zukunftspotential

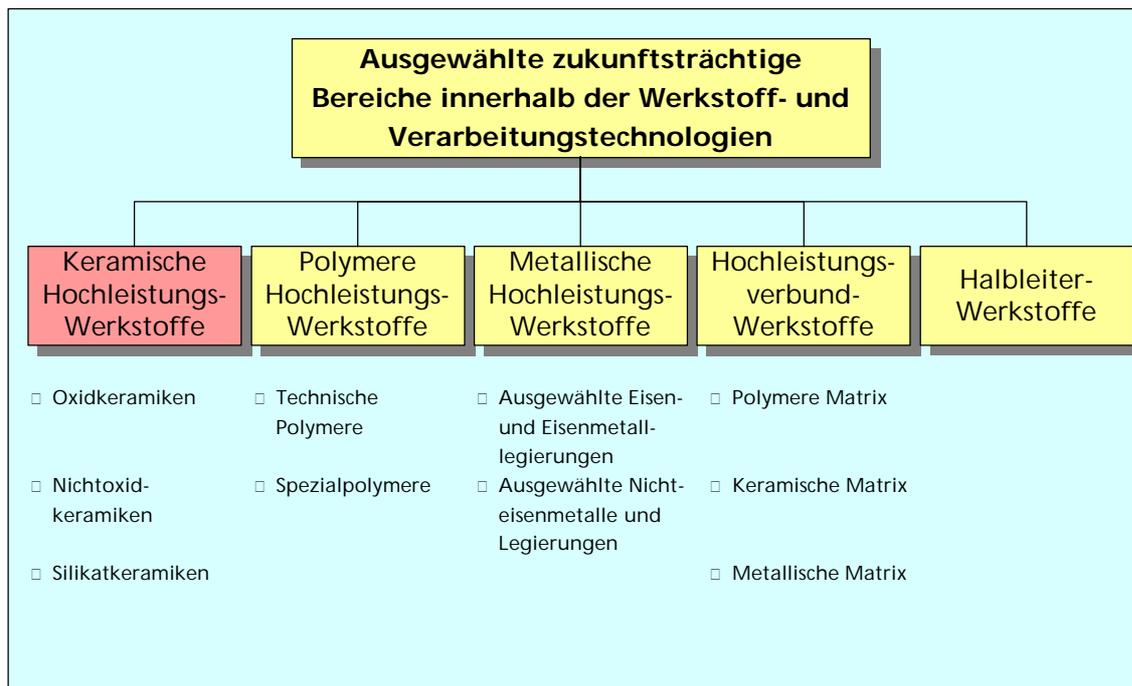
Die Beispiele zeigen, daß sich Keramikwerkstoffe für viele Bereiche in der Chemietechnik hervorragend eignen. Das größte Hindernis, das bislang noch viele Anwendungen blockiert, ist die Sprödigkeit. Und auch die Herstellungskosten sind im Vergleich zu Metallen oder Kunststoffen höher. Dennoch: Verschleißfestigkeit, mechanische und thermische Stabilität sowie die Korrosionsbeständigkeit sind Eigenschaften, die besonders in der chemischen Industrie gefragt sind. Infolgedessen werden in Zukunft keramische Werkstoffe sehr viele Probleme lösen, bei denen Metalle oder Kunststoffe die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit erreicht haben. Mehr und mehr werden wir Keramik in Schlüsselpositionen antreffen, die für die Funktion des ganzen technischen Systems bedeutungsvoll sind oder diese sogar erst ermöglichen (Trouble-shooter-Funktion).

*Dipl.-Ing. Martin Hartmann, Verband der Keramischen Industrie e.V., Informationszentrum Technische Keramik, Schillerstraße 17, 95100 Selb, Tel. 09287-808-42, Fax 09287-70492.



Informationszentrum Technische Keramik

Das Potential der technischen Keramik ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft: Kontinuierlich werden bekannte Werkstoffe verbessert, neue Werkstoffe entwickelt und damit neue Anwendungen erschlossen. Die Werkstoffe von heute sind nicht mehr mit den Materialien zu vergleichen, die vor 10 oder 20 Jahren auf dem Markt waren. Wissenschaftliche Forschung förderte das werkstoffkundliche Verständnis. Verbesserte und neue Fertigungstechnologien brachten erhebliche Fortschritte. Das wesentliche Ziel aller Aktivitäten des Verbandes der Keramischen Industrie e.V., Informationszentrum Technische Keramik (IZTK), ist es, daß Hersteller, Konstrukteure, Anlagenbauer und Anwender enger zusammenarbeiten. Nur durch multidisziplinäre Forschung und Entwicklung sowie Einbindung aller Beteiligten in den Abstimmungsprozeß lassen sich die hohen Erwartungen an die technische Keramik erfüllen. Diese Zielsetzung unterstützt das IZTK durch fundierte und umfassende Informationen über die Fähigkeiten und die Einsatzmöglichkeiten technischer Keramik.



Graphik 2: Zukunftssträngige Werkstoffbereiche (nach ADL, 1994).

Ohne Ecken und Kanten

von Dipl.-Ing. Martin Hartmann*

Während der Umgang mit konventionellen Werkstoffen wie Metallen und Kunststoffen den Ingenieuren sozusagen in Fleisch und Blut übergegangen ist, stößt die Keramik auf mancherlei Vorbehalte. Ein Großteil dieser Vorbehalte beruht jedoch auf der Unkenntnis keramikgerechter Konstruktionsregeln. Werden die Regeln beachtet, ist die Keramik ähnlich unproblematisch wie andere Werkstoffe auch. Allein das 'Gewußt wie' hilft in fast allen Fällen weiter!

Die verantwortlichen Planungs- und Konstruktionsingenieure in den Unternehmen haben im allgemeinen langjährige Erfahrungen mit metallischen und polymeren Werkstoffen; andere Materialien rangieren zunächst einmal unter 'ferner liefern' bzw. als 'interessant, aber exotisch'. Speziell die Präferenz für Metalle beginnt schon früh: In fast jeder gewerblichen Ausbildung gehört das Schleifen und Fräsen von Metallen zur Pflichtübung. Neue oder nicht so häufig eingesetzte Werkstoffe finden dagegen auch in der Ausbildung wenig Beachtung. Das Problem dabei liegt auf der Hand: Womit man nicht vertraut ist, das plant man natürlich konstruktiv nicht ein. Infolge dessen fehlt es an langfristigen Erfahrungen beispielsweise mit dem Werkstoff Keramik. Der Kreis schließt sich...

Obwohl die Technische Keramik seit langem in der Industrie eingesetzt wird und sich dort Standardanwendungen erobert hat, ist der Umgang mit ihr keineswegs selbstverständlich. Dies macht sich vor allem bei den konstruktiven Details bemerkbar: Zu oft wird aus mangelnder Routine ignoriert, daß das Konstruieren mit Keramik anderen, eigenen Regeln folgt. Ein Standardfehler: Man kann – im Gegensatz zu einem Wechsel von einem Metall zu einem anderen – beim Wechsel zur Keramik nicht einfach die ursprüngliche Zeichnung 1:1 in ein Bauteil übertragen. Vielmehr muß der Konstrukteur die technischen Elemente mehr oder weniger neu entwerfen und dabei die keramikgerechten Konstruktionsrichtlinien beachten (s.a. Text im Kasten). Eine weitere Besonderheit der Keramik ist, daß sie ihre Grundform ('Grünkörper' genannt) bereits vor dem eigentlich werkstoffbildenden thermischen Prozeß erhält. Das

Problem: Beim Brennen des geformten Bauteils setzt noch ein Schwindungsprozeß ein, bis der eigentliche keramische Werkstoff vor liegt. Nicht nur das Schwundmaß muß bei der Auslegung bereits eingerechnet werden, diese Eigenart beeinflusst in entscheidendem Maße auch die Konstruktion keramischer Bauteile!

Spezielle Konstruktionsrichtlinien beachten

Um die vorteilhaften Eigenschaften des keramischen Werkstoffs möglichst optimal nutzen zu können, gilt es, die bekannten Problembereiche möglichst geschickt zu meiden. Die Nachteile, wie Sprödigkeit, Fehlanpassungen an die metallene Umgebung durch hohen E-Modul oder geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten, lassen sich mit geeigneten Gestaltungsmaßnahmen, also zum Beispiel Funktionstrennung, Modultechnik sowie druckbelasteten Bauteilen abschwächen oder ganz vermeiden.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Entscheidung über die technische Machbarkeit und über die Wirtschaftlichkeit (Preisfindung auf Grund der Kostenkalkulation) ist eine vollständige und korrekte Zeichnung. Die zu erwartenden Stückzahlen wirken sich entscheidend auf die Wahl des Herstellungsverfahrens und dadurch auf die Kosten aus. Kleinstserien, Einzelstücke und Versuchsteile werden häufig aus einem grünen Rohling herausgearbeitet, während für große Serien die Fertigung mit aufwendigen Werkzeugen z.B. beim Trockenpressen, Strangpressen oder Spritzgießen unverzichtbar ist. Nach verschiedenen Verfahren hergestellte Bauteile besitzen nicht unbedingt identische Eigenschaften (Dichtegradienten, Toleranzen, Wanddicken, Konizitäten, Eigenspannungen). Dies ist vorallem bei der Übertragung von Ergebnissen aus Vorversuchen auf die normale Fertigung zu berücksichtigen.

Keine Spitzen und scharfen Kanten

Aufgrund des gänzlichen Fehlens plastischen Verformungsvermögens bei niederen und mittleren Temperaturen versagt Keramik im Bereich der kritischen Gefüge-Inhomogenitäten spontan beim Erreichen der örtlichen Materialfestigkeit. Die hohen Spannungen treten besonders im Bereich von kleinen Radien, scharfen Kanten, Stufen und Absätzen, Bohrungen sowie im Bereich punkt- oder linienförmiger Krafteinleitungen auf. Unter Umständen wird hier aufgrund der teilweise erheblichen Kerbwirkung die Materialfestigkeit viel früher erreicht, 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 oder optimierter Form verwendet werden.

Dagegen ist die hohe Druckbelastbarkeit eine besondere Stärke keramischer Materialien. Eine keramikgerechte Konstruktion nutzt diese Eigenschaft möglichst optimal aus und hält jene Bereiche möglichst klein, in denen das Teil zug- oder biegebelastet wird. Insbesondere sollten in den zugbelasteten Bereichen starke Spannungskonzentrationen vermieden werden. Diese Grundsätze werden oft nicht ausreichend beachtet – meist deshalb, weil versucht wird, eine Komponente, die ursprünglich „metallisch“ ausgelegt war, formgleich in eine keramische Version zu überführen. Dies erhöht nicht nur die Herstellungskosten, sondern stellt gelegentlich auch die generelle Machbarkeit des Produkts in Frage.

Werkstoffverbund optimiert Verschleißschutz

Besonders das Einbinden keramischer Komponenten in metallische Baugruppen erfordert eine Reihe von konstruktiven Besonderheiten. Diese zu beachten ist wichtig, werden doch in den meisten Anwendungsfällen einzelne Komponenten aus keramischen Werkstoffen mit benachbarten metallischen Bauteilen und Baugruppen verbunden. Dies ist u.a. bei verschleißanfälligen Konstruktionen der Fall, wie der Auskleidung von Schüttguttrinnen. Solche Werkstoffverbunde, also Bauteile, in denen die Keramik gezielt an besonders problematischen Stellen eingesetzt wird, haben ein besonders chancenreiches Marktpotential. Denn in Zukunft wird es mehr und mehr darum gehen, Werkstoffe wie Keramiken als Problemlöser gezielt einzusetzen. Grundsätzlich raten Fachleute zu dieser Konzeption: Keramik in den verschleißbedingten Problemzonen, ansonsten bleibt die Konstruktion möglichst aus Metall. Die Keramik wird hierbei mittels einer kombinierten Füge-technik mit dem metallischen Grundkörper verbunden. Unter kombinierter Füge-technik ist die sowohl kraft- als auch formschlüssige Verbindung der Keramik mit dem Träger zu verstehen.

Vorteilhafte Modulbauweise

Kompliziert geformte oder große Keramikkörper lassen sich mit den üblichen Formgebungsverfahren (s.u.) unter Umständen gar nicht oder nur mit erheblichem Aufwand herstellen. Eine vielfach praktizierte Methode ist, das aufwendige Teil in zwei oder mehrere einfache oder kleinere Einheiten aufzuteilen, so daß deren Fertigung wesentlich leichter ist. Es muß lediglich von Anfang an dafür gesorgt werden, daß diese kleineren Einheiten wieder zu einem Ganzen zusammengefügt werden können. Der Aufbau keramischer Bauteile in

Modulbauweise bietet in vielen Fällen auch Vorteile bezüglich der Kombination von Herstellungsverfahren. Darüber hinaus werden die Qualitätssicherung erleichtert, die Beanspruchbarkeit angehoben und thermische Spannungen reduziert. Beispielsweise lassen sich 4 bis 5 m hohe Isolatoren für 550 kV (Großporzellan) aus vorgefertigten Einzelteilen zusammenkleben oder zusammenglasieren. Für das Fügen von gleichen Materialien (Keramik/Keramik) werden verschiedene Techniken in der Praxis bereits erfolgreich eingesetzt:

- Garnieren und Laminieren (Einzelteile werden im Grünzustand zusammengesetzt) mit anschließendem Zusammensintern, z.B. Welle und Rotor bei einigen Ausführungen des Turbolader-Rotor,
- Kleben und
- Löten.

Adäquate Fertigungsverfahren nutzen

Ebenso wie bei der Herstellung metallischer oder polymerer Werkstoffe besitzen selbstverständlich auch die einzelnen Fertigungsverfahren für keramische Bauteile besondere Vorzüge, aber auch Grenzen:

- So können beispielsweise mit dem Schlickergießverfahren Teile mit konstanter Wanddicke hergestellt werden, wobei die erzielbaren Wanddicken im Bereich 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 mit Hilfe von aufwendigen, mehrteiligen Gießformen erzielbar.
- Durch Extrudieren werden üblicherweise rohr- oder stangenförmige Teile angefertigt. Hier liegt die Fertigungskunst in der Einhaltung des Querschnitts des Körpers und der Vermeidung von unzulässigen Verformungen (Durchbiegung, Ovalisierung etc.) in axialer und radialer Richtung.
- Mit Hilfe der Spritzgießtechnik ist es möglich, auch kompliziert geformte, endformnahe Körper herzustellen. Die Werkzeugkosten und die Zahl der zu fertigende Teile stellen bei diesem Verfahren ganz erhebliche Faktoren in der Kostenkalkulation dar.
- Die isostatische Preßtechnik wird unter anderem zum Anfertigen von Rohlingen mit besonders gleichmäßiger Dichte verwendet. Anschließend läßt sich die Keramik mit spanabhebenden Formgebungsverfahren, wie Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen oder Sägen (mit Diamantwerkzeugen), im ungebrannten Zustand weiter bearbeiten.

- Ein häufig verwendetes Verfahren für die Serienproduktion von kleineren Teilen ist die Trockenpreßtechnik. Mit diesem Verfahren lassen sich relativ flache Teile mit einem Verhältnis von Höhen- zu Wandstärken kleiner vier (in Sonderfällen kleiner acht) und keinen zu starken Höhenunterschieden (Sackbohrungen, Stufen etc.) wirtschaftlich herstellen. Die Preßwerkzeuge werden aufgrund der hohen Härte der keramischen Pulver sehr stark verschleißbeansprucht. Für die geforderte Maßhaltigkeit der Teile ist daher die Standzeit der Werkzeuge begrenzt und hat Auswirkungen auf die Kosten.

Fazit:

Werden einige Grundregeln für die keramikgerechte Konstruktion beachtet, ist die Konstruktion mit Technischer Keramik nicht schwieriger als der Umgang mit anderen Werkstoffen. Für den Erfolg ist die enge Zusammenarbeit zwischen Keramikhersteller und Konstrukteur wichtig: Bereits in der Planungsphase müssen Informationen über die genaue Funktion des zu entwerfenden Bauteils und die Eigenschaften der in Frage kommenden keramischen Werkstoffe beschafft werden. Die Machbarkeitsstudie sollte nicht nur die technischen Randbedingungen, sondern auch den Kostenrahmen abstecken, um die Gefahr von Fehlinvestitionen - auch bei Planungs- und Entwicklungskosten - möglichst frühzeitig zu erkennen. Geradezu ideale Bedingungen liegen natürlich vor, wenn der Konstrukteur mit der Keramik umzugehen weiß und der Materialproduzent Verständnis für die technischen Abläufe des Kunden hat. Dann steht einem Einsatz der Keramik als Konstruktionswerkstoff nichts mehr im Wege.

*Dipl.-Ing. Martin Hartmann, Verband der Keramischen Industrie e.V., Informationszentrum Technische Keramik, Schillerstraße 17, 95100 Selb, Tel. 09287-808-42, Fax 09287-70492.

Wie belastbar ist eine Konstruktion?

Hersteller und Anwender keramischer *Keramikgerechte Konstruktionsprinzipien*

Duktile (metallische) Werkstoffe und spröde (keramische) Werkstoffe unterscheiden sich in vielfacher Hinsicht. Zwar kann der klassische Konstrukteur auf gewisse Analogien aus der Gießtechnik und den Fertigungsmöglichkeiten der Pulvermetallurgie zurückgreifen, jedoch nicht bei allen Konstruktionen – technische Keramik hat eigene Gesetzmäßigkeiten:

- Druckspannungen sind von Vorteil: Druckspannungen in der Keramik sind bei der Konstruktion stets zu bevorzugen.
- Vermeidung von Spannungsspitzen und Materialanhäufungen: Spannungsspitzen im keramischen Bauteil sind durch weiche Übergänge an Absätzen und Kanten vermeidbar. Beim Kontakt mit anderen Bauteilen ist auf eine große Kontaktfläche zu achten (Flächenkontakt statt Punkt- oder Linienkontakt)
- Einfache Bauteilgeometrie: Kompliziert geformte Bauteile sollten u.U. segmentweise aus Bauteilen mit einfacher Geometrie aufgebaut werden. Dies erhöht häufig die Fehlertoleranz des Gesamtbauteils und senkt die Herstellungskosten durch eine vereinfachte Fertigung.
- Wenig Endbearbeitung anstreben

Wie Bauteile beurteilen die mechanische Belastbarkeit von Konstruktionen derzeit auf vier Wegen:

- entsprechend der Erfahrung (intuitives Wissen),
- mit analytischer Berechnung der Spannungsverteilung oder
- mit numerischer Berechnung der Spannungsverteilung und der Berechnung der örtlichen Verteilung der Ausfallwahrscheinlichkeit mit statistischen Methoden.

Der Aufwand für die Festigkeitsauslegung mittels statistischer Methoden ist sehr hoch. Allerdings lassen sich bestimmte Eigenschaften des Werkstoffes erst mit Hilfe dieses mathematischen Verfahren ausnutzen. Nach den gleichen Verfahrensweisen lassen sich keramische Bauteile für die Langzeitanwendung und Ermüdungsbeanspruchung beurteilen. Da jedoch das Versagen dieser Werkstoffe meist auf eine Riß-Initiierung und auf Rißwachstumsvorgänge zurückzuführen ist, ist bei besonders kritischen, hochbelasteten Bauteilen die Anwendung der bruchmechanischen Methode in Verbindung mit numerischen Rechenverfahren und statistischen Versagensmodellen verfügbar. Trotz der Existenz der heutigen Berechnungsmethoden ist die 'Erfahrung' nicht zu unterschätzen. Für weniger sensible Anwendungen werden in der Praxis entsprechend intuitivem Wissen und überschlägiger Berechnungen sowohl die Materialien, wie auch die Betriebsbelastungen beurteilt und die Bauteile ausreichend sicher ausgelegt. Nicht zuletzt stammen die wichtigsten Grundregeln für das Auslegen keramischer Werkstoffe aus dem langjährigen Erfahrungsschatz von Praktikern.

Einsatz von Technischer Keramik bei Verschleißproblemen

Dr. R. Matt;

TeCe Technical Ceramics GmbH & Co. KG

Selb

Technische Keramik kann aufgrund herausragender Eigenschaften, z.B. hoher Verschleißwiderstand und chemische Beständigkeit, selbst unter extremsten Bedingungen eingesetzt werden. Dadurch lassen sich erhebliche Verbesserungen hinsichtlich der Lebensdauer und der Wirtschaftlichkeit ermöglichen. Darüberhinaus können die Einsatzgrenzen von Maschinen und Apparaturen verschoben werden. Am Beispiel von Exzentrerschneckenpumpen wird die erfolgreiche Entwicklung von keramischen Rotoren bis zur Serienreife demonstriert und gezeigt, daß eine Substitution von metallischen durch keramische Rotoren möglich und mit zahlreichen technischen und wirtschaftlichen Vorteilen verbunden ist.

Technische Keramik, ein Werkstoff mit vielen Vorteilen

Unsere hochentwickelte Industriegesellschaft wäre ohne die in den letzten Jahrzehnten gemachten Fortschritte in der Materialforschung undenkbar. Beispiele hierfür lassen sich in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, dem Maschinen- oder Anlagenbau oder der Elektronik finden. Mit dem Ziel immer leistungsstärkere, sparsamere und zuverlässigere technische Systeme zu entwickeln, steigen die Anforderungen an Konstruktionswerkstoffe immer weiter an. Inzwischen kann ein Konstrukteur aus einer ungeheuren Vielzahl von Materialien (metallische Werkstoffe, Kunststoffe, Gläser, Keramik usw.) einen für seine Problemstellung geeigneten Werkstoff auswählen. Der zunehmende Wettbewerbsdruck bedingt, daß neben den technischen Erfordernissen immer stärker wirtschaftliche Gesichtspunkte die Materialauswahl bestimmen. Oft wird jedoch die Wirtschaftlichkeit an den reinen Material- und den notwendigen Bearbeitungskosten gemessen. Die Verwendung eines vergleichsweise teuren Werkstoffs kann sich dennoch, über eine Erhöhung der Lebensdauer

bzw. Standzeit des technischen Systems (verringerte Wartungsintervalle), in sehr vielen Fällen lohnen.

Im Bereich von Anwendungen unter extremer Verschleiß- und Korrosionsbeanspruchung (z.B. Gleitringdichtungen, Wellenschutzhülsen usw.) sind heute Werkstoffe aus Technischer Keramik nicht mehr wegzudenken. Viele verbinden mit dem Begriff Keramik die Werkstoffe, die im Bereich der Geschirr- oder Fliesenkeramik Verwendung finden und auf eine lange Tradition zurückblicken können. Weniger bekannt und bedeutend jünger ist dagegen die Technische Keramik. Zur Technischen Keramik (Hochleistungskeramik) zählen Werkstoffe wie z.B. Siliziumcarbid (SiC), Siliziumnitrid (Si₃N₄), Aluminiumoxid (Al₂O₃) und Zirkonoxid (ZrO₂). Diese Werkstoffe zeigen selbst unter extremen Beanspruchungsbedingungen außergewöhnlich günstige Eigenschaften. Für den extremen Verschleißwiderstand ist die hohe Härte verantwortlich. Auch für Hochtemperaturanwendungen (mit Temperaturen z.T. höher als Schmelztemperaturen von Metallen) läßt sich Technische Keramik einsetzen. Die weitgehende chemische Beständigkeit (insbesondere von SiC) führt dazu, daß selbst Säuren oder Laugen diesen Werkstoffen kaum etwas anhaben können. Der gravierendste Nachteil von Hochleistungskeramik ist die Sprödigkeit. Im Gegensatz zu Metallen fehlt der Technischen Keramik die Fähigkeit sich plastisch zu verformen. Es fehlt damit aber auch die Möglichkeit des Abbaus von lokalen Spannungspitzen. Folge ist, daß dem Versagen einer keramischen Komponente keine plastische Verformung vorausgeht. Mit der Einhaltung von z.T. sehr einfachen Konstruktionsprinzipien [1] kann dieser Eigenschaft Rechnung getragen werden. Der Einsatz von Technischer Keramik kann dann für viele Einsatzfälle ein erhebliches Verbesserungspotential, sowohl in technischer, wie auch in wirtschaftlicher Hinsicht, bieten.

Keramikrotoren bei Exzentrerschneckenpumpen vermindern Verschleißprobleme

Bei Exzentrerschneckenpumpen können z.B. durch abrasive Medien erhebliche Verschleißprobleme, Stillstandzeiten der Maschinen und damit verbunden hohe Kosten auftreten. Exzentrerschnecken-Pumpen werden zum Fördern von abrasiven und aggressiven Medien eingesetzt. Das Förderelement besteht aus einem schraubenförmigen Rotor (mit großer Steigung), der sich in einem Stator aus Elastomer dreht. Der Rotor besteht in der Regel aus Stahl, metallischen Speziallegierungen oder beschichteten Metallen. Aufgrund des ständigen Kontaktes mit den zu fördernden Medien und der damit verbundenen mechanischen Belastung ist der Rotor besonders verschleißanfällig. Beim Fördern von abrasiven Medien wie

Klärschlämmen, feststoffhaltigen Schmutzwässern oder Chemikalien können dadurch metallische Rotoren schnell verschleifen. Meist werden Feststoffpartikel im elastischen Stator vom Rotor überrollt und hinterlassen im Metall eine Verschleißspur. Mit steigendem Verschleiß des Rotors wird das System undicht und es tritt weiterer Verschleiß von Rotor und Stator durch verstärktes Rückströmen von Fördergut auf.

Um dieses Problem durch den Einsatz von Keramik zu lösen suchte ein Hersteller von Exzentrerschneckenpumpen (Netzsch Mohnopumpen GmbH; Waldkraiburg) einen Keramikhersteller. Mit der TeCe Technical Ceramics GmbH & Co KG in Selb fand sie in Deutschland einen erfahrenen Partner, der schon anderen Unternehmen mit ähnlichen Problemstellungen erfolgreich helfen konnte.

Um den extrem hohen Verschleißwiderstand und die exzellente Korrosionsbeständigkeit von Technischer Keramik auszunutzen, sollte der metallische durch einen keramischen Rotor ersetzt werden. Im Rahmen eines Verbundvorhabens innerhalb des Förderprogramms "Neue Werkstoffe" des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Verkehr hatte man sich das ehrgeizige Ziel gesetzt innerhalb von drei Jahren einen keramischen Rotor zu entwickeln, in größeren Serien zu fertigen und in das bestehende Pumpsystem der Netzsch Mohnopumpen GmbH zu integrieren. Durch die Entwicklung einer Herstelltechnik für Rotoren aus Technischer Keramik und einer Verbindungstechnik zwischen metallischem Antriebselement und Keramikrotor einerseits und zwischen in Modultechnik aufgebauten keramischen Rotorelementen andererseits, wurde diese Aufgabe gelöst.

Als Werkstoff für den Keramikrotor wurde gesintertes Siliciumcarbid (SSiC) ausgewählt, da dieser eine extrem hohe Härte und eine umfassende chemische Beständigkeit aufweist.

Durch die hohe Härte des Siliziumcarbids wird der mechanische Verschleiß drastisch reduziert, weil praktisch alle Feststoffpartikel im Fördergut weicher sind als das keramische Rotormaterial. Ein Sandkorn, das sich im elastischen Stator eingenistet hat, schädigt den keramischen Rotor also nicht. Chemischer Angriff findet ebenfalls nicht statt, da Siliciumcarbid über den gesamten pH-Bereich chemisch beständig ist. Ein weiterer Vorteil ist das gegenüber Stahl deutlich geringere Gewicht der Keramikrotoren ($>3,1\text{g/cm}^3$), wodurch das Bauteil weniger als die Hälfte einer entsprechenden Ausführung aus Stahl wiegt. Die Gewichtskräfte des sich im Stator frei drehenden Rotors wirken dadurch weniger auf das Pumpsystem und somit können die Drehzahlen deutlich erhöht werden. Höhere Drehgeschwindigkeit des Rotors bedeutet aber, daß der Anwender eine vergleichbare Pumpleistung mit einer kleineren

Pumpengröße erzielen kann. Dadurch können wiederum die Investitionskosten deutlich gesenkt werden.

Die Herstellung eines keramischen Bauteils unterscheidet sich wesentlich von dem gängiger Werkstoffe. Zunächst wird feinstes Pulver, dem verschiedene Zusatzstoffe (Sinterhilfsmittel, organische Binder) zugesetzt werden, zu einem Preßgranulat verarbeitet und zu Rohkörpern, sogenannten Grünkörpern, gepreßt. Durch den gezielten Zusatz von Bindemitteln wird es möglich, die porösen und damit zerbrechlichen Grünkörper durch Drehen, Fräsen und Bohren zu bearbeiten. Durch den anschließenden als Sinterung bezeichneten Brand (bei etwa 2200°C) unter Schutzgas, wird die poröse Keramik in ein dichtes Bauteil überführt. Dabei werden die Poren durch einen thermisch aktivierten Materialtransport allmählich gefüllt. Durch diesen Stoffumverteilungsprozeß in die Porenbereiche kommt es zu einer Reduzierung der Bauteilabmessungen, also zum "Schrumpfen" (Schwindung) des Bauteils von über 20 Prozent. Es ist leicht einzusehen, daß zu einer formstabilen, maßhaltigen und einer reproduzierbaren Herstellung dieser Effekt berücksichtigt und beherrscht werden muß. Für eine wirtschaftliche Herstellung ist die Kenntnis und Vorhersagbarkeit (Berechnung) der Schwindung in sehr engen Grenzen eine wesentliche Forderung. Denn jede der Sinterung nachfolgende Bearbeitung z.B. durch Schleifen ist aufgrund der hohen Härte der Technischen Keramik nur unter erheblichem Aufwand (und damit Kosten), z.B. durch Verwendung von Diamantwerkzeugen für die Bearbeitung, möglich.

Die Aufgabenstellung einer reproduzierbaren und wirtschaftlichen Herstellung des Keramikrotors konnte mit der beschriebenen Vorgehensweise erfüllt werden. Außerdem ist das gewählte Produktionsverfahren äußerst flexibel und besonders geeignet für die Herstellung von Klein- und Mittelserien. Darüberhinaus lassen sich mit diesem Verfahren auch Bauteile mit anderen keramischen Werkstoffen wie zum Beispiel Siliziumnitrid oder Oxidkeramik (z.B. Al_2O_3) herstellen.

In einem weiteren Entwicklungsschritt wurde das Bauteil in das bestehende Pumpsystem integriert. Dafür wurde eine Verbindungstechnik entwickelt, mit der die Krafteinleitung vom mechanischen Antrieb in den keramischen Rotor gelöst werden konnte. Da die Gesamtlänge des Rotors vom jeweiligen Einsatzfall abhängt, wurde eine Modultechnik für Keramikrotoren entwickelt (Abb.1). Die Einzelmodule können mit der gefundenen Verbindungstechnik zu größeren Bauteillängen (80-1000mm) kombiniert werden. Der Durchmesserbereich liegt

zwischen 15 und 90 mm. Durch die Anwendung der Modultechnik wird weiterhin das keramische Herstellverfahren begünstigt und damit eine sichere Produktion ermöglicht.

Die Vorteile des im Rahmen dieses Projektes entwickelten Systems liegen auf der Hand. Der keramische Rotor ermöglicht den Einsatz der Exzentrerschnecken-Pumpen in neuen, bisher nicht abzudeckenden Anwendungsfällen. Durch längere Standzeiten ergeben sich geringere Lebenszykluskosten und erhebliche Einsparungen durch niedrigere Wartungskosten, reduzierte Ausfallzeiten und geringeren Ersatzteilverbrauch.



Bild1: Keramik-Rotoren unterschiedlicher Abmessungen

Literatur:

- [1] Brevier der Technischen Keramik