

5. Maschinenbau

- **Aluminiumoxid in Verschleißschutzanwendungen**
- **Ausgewählte Beispiele für den Einsatz von Keramik**

Aluminiumoxid in Verschleißschutzanwendungen

Dr. Hans Hoppert

ETEC

Gesellschaft für Technische Keramik mbH

Siegburg

Keramische Bauelemente als Isolatoren, als Aktoren und als Sensoren sind in Elektrik und Elektronik Stand der Technik. In der Konstruktionstechnik spielen sie im Vergleich zu Stahl immer noch eine geringe Rolle. Es ist oft sehr schwer, einen Anwender zu überzeugen, daß Keramik im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen Vorteile bringt.

Was sind die Gründe hierfür?

Der Konstrukteur kennt die Metalle und denkt in Metallen !

Keramische Komponenten sind nicht spektakulär, sieht man einmal vom Einsatz in der Raumfahrt und als Endoprothesen in der Medizin ab.

Es stört die volkstümliche, aber viel zu enge gedankliche Verbindung von Keramik und Kaffeetasse!

Der keramische Wert von Zündkerzen, Lambdasonde, Katalysatorträger, Elektroniksubstraten und vielleicht Portliner bewegt sich - selbst für einen Sechszylindermotor - in der Größenordnung von einigen 100 DM. Eine zeitgemäße Funktionserfüllung des Automobils ist aber ohne diese keramischen Komponenten undenkbar.

Durch die Bewertung auf der Basis von Umsatzerwartungen in DM und kg alleine, wird die Innovationskraft der Technischen Keramik deutlich unterschätzt. Aufgrund hervorragender Eigenschaftskombinationen kann sie oft mit Pfennigbeträgen entscheidenden Einfluß auf die Funktionsfähigkeit von sehr kostenaufwendigen Gesamtsystemen nehmen. Das notwendige Umsatzdenken auch in der keramischen Industrie als Zulieferer von nackten Keramikteilen wirkt in der Kreativephase von Produkten (kleine Stückzahlen, hohe Werkzeugkosten, häufig Probleme in der

Reproduzierbarkeit) oft erschwerend und kann nur durch die Verstärkung von gesamtheitlichen Lösungsansätzen mit der Anwenderindustrie überwunden werden. Hierzu wird die neue Generation von Maschinenbauern auf der Basis eines ausgewogenen Verständnisses für Metalle, Kunststoffe und Keramik einen wesentlichen Beitrag leisten können und müssen.

Wie wir gesehen haben, bestehen wesentliche Unterschiede in der Belastungsfähigkeit und Gestaltung von Bauteilen aus duktilen metallischen Werkstoffen und den spröden keramischen Werkstoffen. Gewisse Analogien findet der Konstrukteur in den Grundregeln des gußgerechten Konstruierens und den Fertigungsmöglichkeiten der Pulvermetallurgie. Daraus ergeben sich folgende Forderungen für eine keramigerechte Konstruktion:

- **Zugspannungen möglichst gering halten. Die Bauteile auf Druck belasten !**

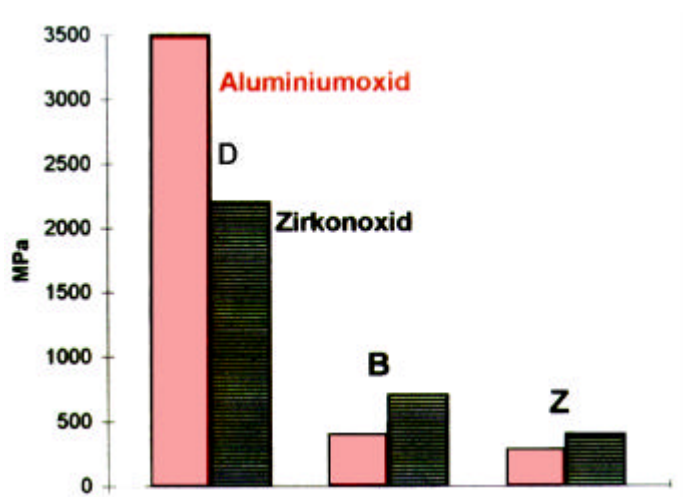


Bild 1: Vergleich Druck-, Biege- und Zugfestigkeit bei Al_2O_3 und ZrO_2

- **Einfache Formen anstreben, scharfe Ecken und Kanten vermeiden, um die Sprödbruchgefahr zu minimieren !**

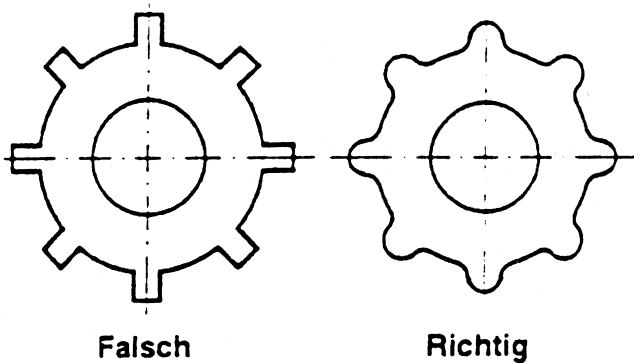


Bild 2: Spannungskonzentration durch Kerbwirkung

- **Flächige Krafteinleitung bevorzugen. Punkt- und linienförmige Krafteinleitungen führen zu Rißbildung, da die Spannungen nicht durch plastische Verformung abgebaut werden können.**

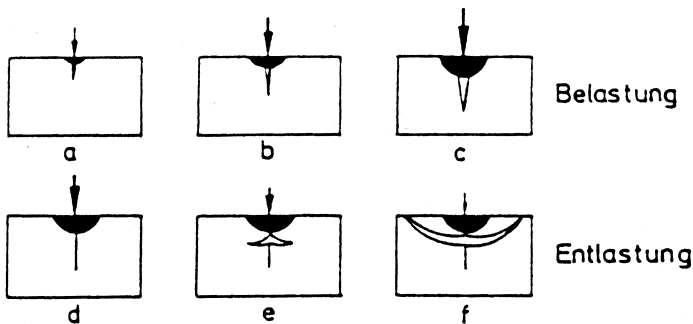


Bild 3: Entstehung von Rissen durch punktförmige Belastung

- **Temperaturgradienten wegen der eingeschränkten Thermoschockbeständigkeit vor allem bei dichten Werkstoffen vermeiden!**
- **Spannungen in gefügten Bauteilen bei unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten und elastischen Konstanten der Fügepartner berücksichtigen !**

1. Verbund Konstruktionen

Kompliziert geformte oder große Keramikbauteile lassen sich mit den herkömmlichen Formgebungs- und Sinterverfahren nicht oder nur mit erheblichem Aufwand herstellen. Eine vielfach angewendete Methode ist es, das Bauteil in zwei oder mehrere einfache kleinere Einheiten aufzuteilen.

Der Aufbau der keramischen Bauteile in Modulbauweise bietet in viele Fällen Vorteile, besonders durch die wirtschaftliche Nutzung einer Kombination optimierter Herstellungs-

verfahren und durch Anhebung der Beanspruchbarkeit z.B. mit der Reduzierung der thermischen Spannungen sowohl beim Brand wie auch in der Anwendung.

Für **Keramik/Keramik - Verbunde** werden in der Praxis verschiedene Techniken erfolgreich eingesetzt. Die wichtigsten sind:

- **Garnieren** (Zusammensetzen von Bauteilen im Grünzustand)
- **Laminieren** (aus grünen Folien)
- **Zusammensintern**
- **Kleben**
- **Löten** (metallische Lote, Glaslote)

Der Verbindungs- und Füge-technik 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 in das Gesamtsystem zu integrieren. Maßgebend für die Wahl der Füge-technik sind die Partnerwerkstoffe und die Anforderungen, die an die Verbindung gestellt werden. In praktisch allen Fällen steht das Verhalten der Funktionseinheit im Vordergrund. Die eigentliche Aufgabe der Konstruktion besteht darin, die plastischen, elastischen, thermischen und geometrischen Dehnungsunterschiede zwischen der Keramikkomponente und dem Fügepartner beanspruchungsgerecht aufeinander abzustimmen.

Bei **Keramik- / Metallverbindungen** ist im allgemeinen der Ausdehnungskoeffizient des Metalls deutlich höher als der der Keramik. Mit steigender Temperaturdifferenz zwischen der Füge- und der Anwendungstemperatur entstehen aufgrund von behinderten Verformungen ansteigende Spannungen im Bereich der Füge-stelle. Dies gilt für alle Verbindungstechniken gleichermaßen. Können diese Spannungen nicht durch plastische Verformungen oder durch formelastische Glieder abgebaut werden, führen diese Spannungen zum frühzeitigen Versagen.

Da die keramischen Werkstoffe kein plastisches Verformungsvermögen zum Abbau von Spannungsspitzen besitzen, muß diese Aufgabe von anderer Stelle übernommen werden. Durch die gezielte Wahl der Fügepartner, eine Optimierung der Geometrie der Füge-verbinding und geeignete Hilfswerkstoffe muß versucht werden, vor allem die Zugspannungen in der Keramik möglichst klein zu halten bzw. abzubauen. Hierbei sind die in Frage kommenden Betriebsbedingungen besonders zu berücksichtigen.

Wahl der Fügepartner: **AK - angepaßte Werkstoffe**
ferritische an Stelle von austenitischen Stählen

Geometrie der Fügeverbindung: **Wandstärken anpassen**
Übergangsbereiche z.B. Dehnungsfugen festlegen
Verwendung von Luftspalte

Fügehilfsstoffe: **Lote, Kleber auf die Fügepartner abstimmen**
formelastische Ausgleichsstoffe anwenden

2. Fügeverfahren

Keramische Bauteile müssen häufig vor allem mit metallischen Bauteilen verbunden werden. Es wird zwischen mechanischen Fügeverfahren, die zu Form- oder Kraftschluß führen und stoffschlüssigen Fügeverhalten unterschieden.

Mechanische Fügeverfahren: **Einschrumpfen**
Eingießen
Klemmen
Stecken
Schrauben

Stoffschlüssige Fügeverfahren: **Löten**
Schweißen
Kleben
Kitten

Nur einige Fügeverfahren sollen hier etwas ausführlicher diskutiert werden:

Einschrumpfen

Durch Einschrumpfen der Keramik in ein Metallteil wird erreicht, daß in der Keramik Druckspannungen auftreten. Beim Einschrumpfen kann entweder das Metallteil aufgeheizt werden oder das Keramikteil abgekühlt werden. Die Schrumpfspannungen lassen sich aus der

Geometrie des Keramik- und des Metallteils sowie den Wärmeausdehnungskoeffizienten und den elastischen Konstanten berechnen.

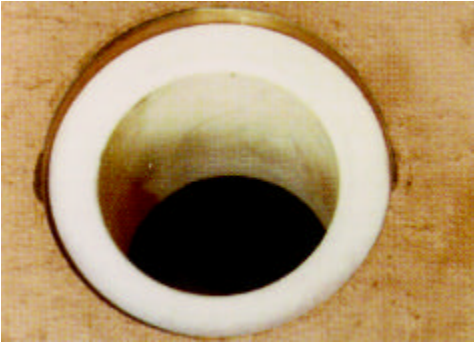


Bild 4: Einschrumpfen von Düsen in Stahlblock

Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode besteht darin, daß durch die vorliegenden Druckspannungen die Thermoschockfestigkeit der Keramik deutlich erhöht wird.

Klemmen

Klemmen stellt eine einfache Verbindungstechnik dar, bei der bei Raumtemperatur keine Thermospannungen auftreten. Es muß aber darauf geachtet werden, daß nach Möglichkeit das gesamte Keramikteil unter Druck steht. Punkt- oder linienförmige Auflagen sind zu vermeiden.

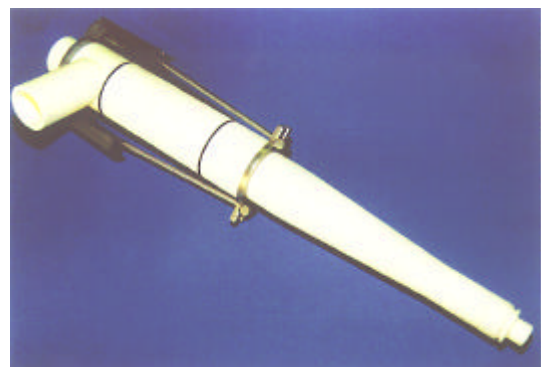
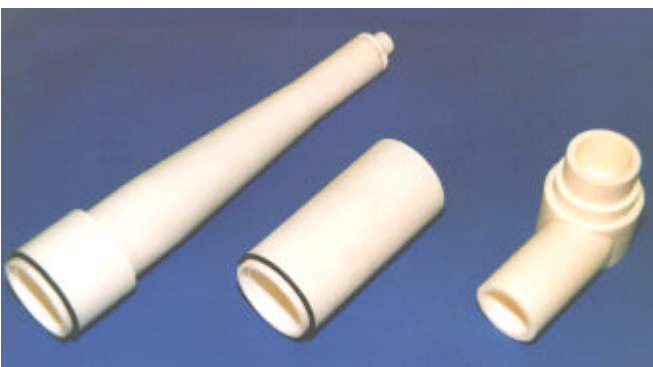


Bild 5: Klemmen am Beispiel Hydrozyklon

Kleben und Kitten

Bei Klebeverbindungen werden raumhärtende oder temperaturhärtende Kleber verwendet. Im



Gegensatz zum Löten treten wegen der niedrigen Temperaturbelastung nur geringe Eigenspannungen auf.

Das Einkitten von Rohrsegmenten in den Stahlmantel ist unter anderem ein erprobtes Verfahren bei der Auskleidung von Rohren. Die Auswahl des Zements richtet sich nach der auftretenden thermischen Belastung.

Ein vulkanisieren von Keramik in Gummi wird angewandt, wenn bei der Montage ein hohes Maß an Flexibilität gefordert wird. Dies trifft z.B. bei der Belegung von Antriebsrollen von Förderbändern mit Noppenkeramik zu.

Bild 6: Auskleidung von Rohren mit

Keramiksegmenten

Löten

Beim Löten entstehen während des Abkühlens aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung von Metall / Lot / Keramik Eigenspannungen. Die Höhe dieser Eigenspannungen ist abhängig von den thermischen Ausdehnungskoeffizienten, den elastischen Konstanten und von der Geometrie der Lötverbindung. Besonders zu beachten sind die Spannungsverteilungen am Rand der Lötverbindung.

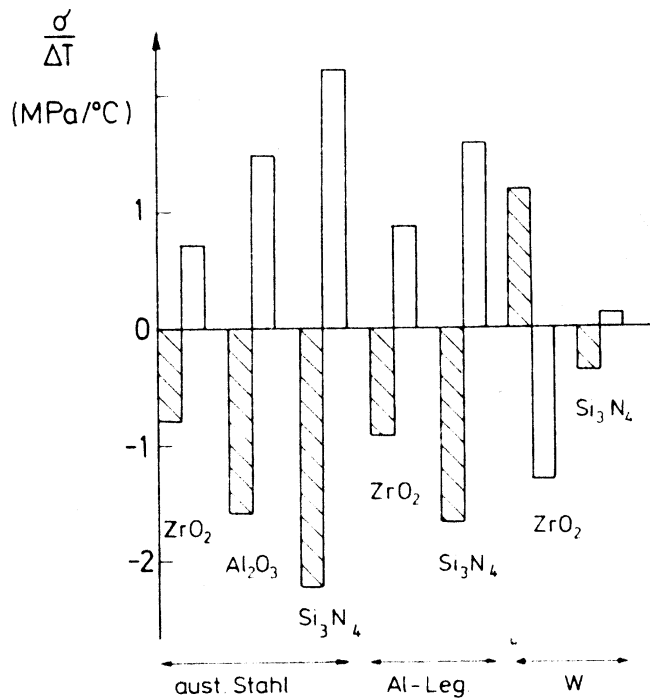


Bild 7: Spannungen in gefügten Bauteilen

Ziel aller Fügeverfahren muß sein:

- Die vorteilhaften Eigenschaften der Werkstoffe nutzen, ohne daß die nachteiligen Eigenschaften versagenskritisch werden.
- Krafteinleitung und Fügeverfahren müssen den Werkstoffeigenschaften entsprechen.
- Materialkombinationen mit Funktionstrennung verwirklichen, so daß die Nachteile des einen Werkstoffes durch den anderen kompensiert werden.

3. Anwendungen

Bewährte Formgebungsverfahren für keramische Bauteile sind axiales Pressen, der Schlickerguß (Prototypen und Kleinserien), das Extrudieren (speziell für rotationssymmetrische Bauteile) und das Spritzgießen. Vor allem die isostatische Preßtechnik - in Verbindung mit der Grün- oder Weißbearbeitung - erlaubt die Herstellung von vielfältigen und auch komplizierten Bauformen.



Bild 8: Isostatisch gepresste Bauteile

In den folgenden Bildern sind einige interessante, durch Fügen hergestellte Bauteile zusammengestellt. Wichtigstes Ziel war immer die Fertigung kostengünstiger Bauteile.



Bild 9: Mahlscheiben für Attritormühle

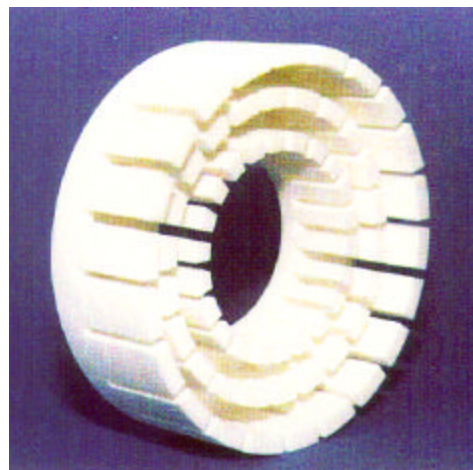


Bild 10: Dispergierkopf für Hochleistungsmischer



Bild 11: Düsen und Staurohre
(Venturidüsen)



Bild 12: Konus mit Hinterschneidung

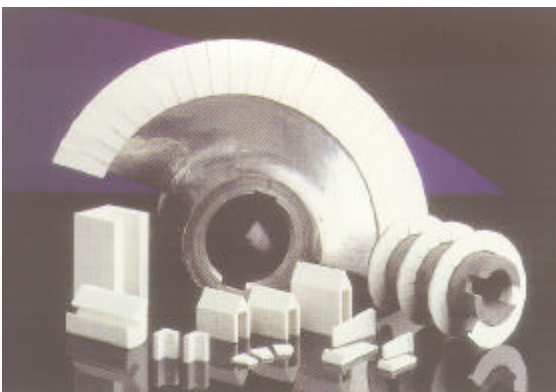


Bild 13: Förderschnecken mit Kantenschutz

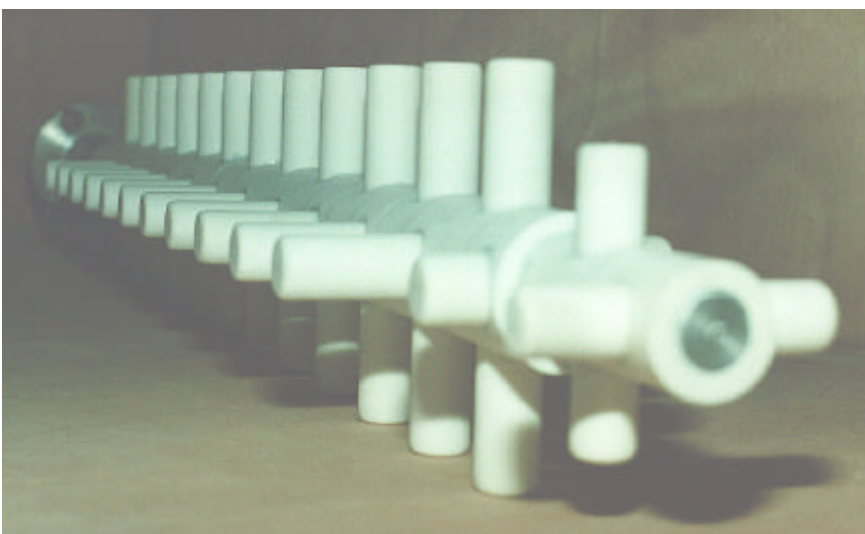
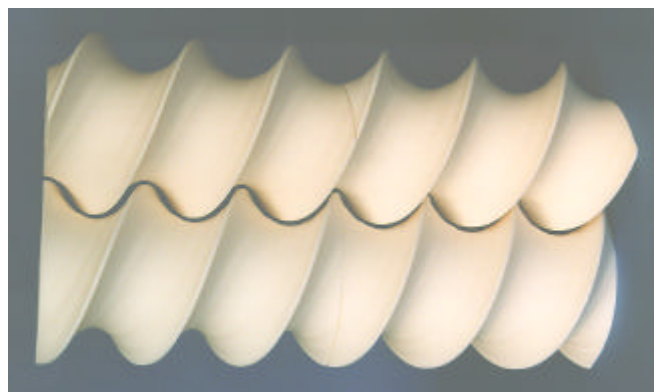


Bild 14: Antriebswelle für Attritormühle

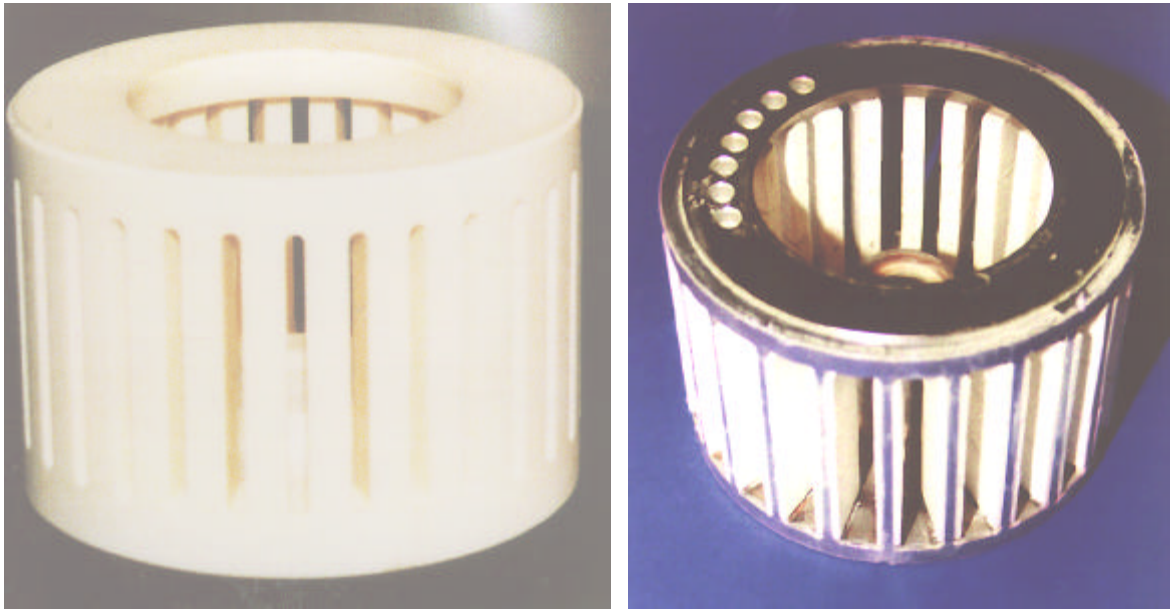


Bild 15: Sickerkorb als Monolith und in Modulbauweise

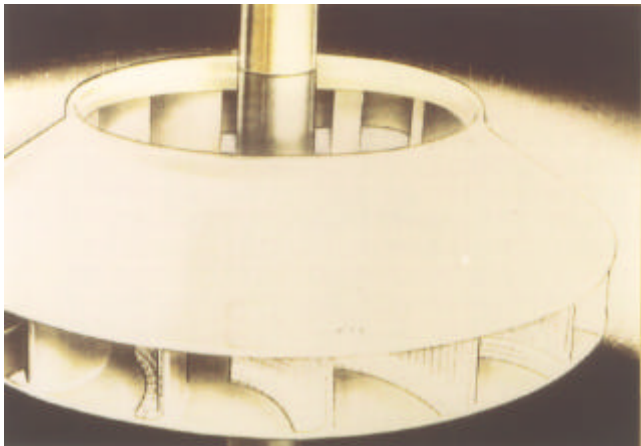


Bild 16: Flügelrad

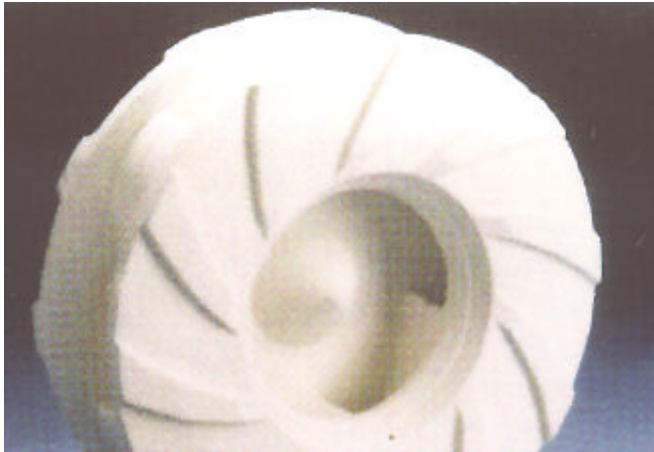


Bild 17: Impeller für Schlammepumpen

Ausgewählte Beispiele für den Einsatz von Keramik

Dipl.-Ing. André Hiemann

TeCe

Technical Ceramics GmbH & Co. KG

Selb

Kundenerwartung

Die Situationen ähneln sich oft!

Ein Bauteil einer technischen Anlage funktioniert nicht so wie es soll, der eingesetzte Werkstoff gibt früher seinen Geist auf als gewünscht.

Der Einsatzfall läßt darauf schließen, daß Technische Keramik eine Lösung bringen kann.

Man wendet sich an einen oder mehrere Hersteller solcher Keramiken oder z.B. an das Infozentrum des VKI und schildert sein Anliegen.

Was erwartet der Kunde danach vom Keramikhersteller?

Er erwartet nichts weiter als ein keramisches Bauteil, das:

1. seinen vorgesehenen Zweck erfüllt,
2. in einer vom Anwender benötigten Stückzahl zu einem angemessenen Preis und
3. in einem vom Kunden gewünschten Zeitraum zu seiner Verfügung steht.

Der Weg dorthin

Diese drei oben genannten Punkte greifen so eng ineinander, daß eine Lösung oft nur gemeinsam zwischen Anwender und Hersteller erarbeitet werden kann.
Die enge Verflechtung wird anhand der folgenden Aufstellung deutlich.

-Werkstoffeigenschaften:

der gewählte Werkstoff muß die geforderten Betriebsbedingungen erfüllen

-Stückzahl und Preis:

stehen in sehr engem Zusammenhang!

Der Preis hängt darüber hinaus ab von: -Werkstoff
-Bearbeitungszustand bzw. -genauigkeit

-Fertigungsverfahren:

ergibt sich aus der benötigten Stückzahl und der geforderten Geometrie

Im Einzelnen betrachtet bedeutet das:

An erster Stelle steht die Wahl eines geeigneten Werkstoffs, der die geforderten Betriebsbedingungen erfüllen muß.

Eine Auswahl der zum Teil sehr unterschiedlichen Eigenschaften von üblichen Hochleistungskeramiken ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

*** = Eigenschaft, die innerhalb der Hochleistungskeramiken herausragend ist und sie für eine entsprechende Anwendung prädestiniert.

	"Zähigkeit"	Temp.- beständ.	chemische Beständ.	Verschleiß- beständ.	Thermo- schock- beständ.	Wärme- ausdehnung	Allg. Fertig.
Al ₂ O ₃	-	**	***	***			
SSiC	-	***	***	***	**		
SiSiC	-	**	**	***	**		***
Zirkonoxid TZP	***	*	**	**		Ähnlich Stahl	
SSN	***	**	*	**	***		

Bild 1: Werkstoffe

Ist der passende Werkstoff gefunden, muß daraus auch das betreffende Bauteil zu einem vom Markt akzeptierten Preis herstellbar sein.

Dazu muß klar sein, in welchen realistischen Stückzahlen das Teil benötigt wird. Diese infrage kommende Stückzahl favorisiert ein oder mehrere Fertigungsverfahren oder schließt sie von vornherein aus.

Denn große Stückzahlen lassen sich in der Regel durch andere Fertigungsverfahren wirtschaftlicher herstellen als geringe Stückzahlen und umgekehrt.

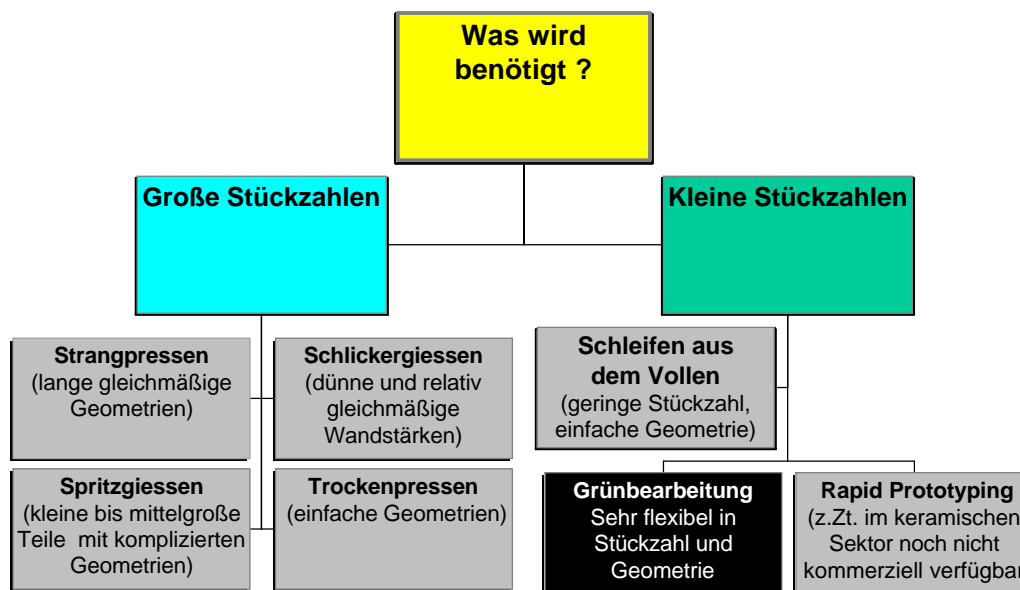


Bild 2: Fertigungsverfahren

Neben einigen Massenanwendungen hat sich der Einsatz von Keramik im Maschinenbau zur Lösung von Spezialanwendungen in Kleinserien oder sogar von Einzelstücken durchgesetzt.

Ein effizienter Weg zur Fertigung solch kleiner Stückzahlen ist die sogenannte „Grünbearbeitung“ des keramischen Werkstoffs.



Bild 3: Fertigungsschritte

- Naßisostatisch gepresster Rohling
- Überdrehter Rohling
- Durch Drehen, Fräsen, Bohren daraus hergestellte Düse
- Entbinderte Düse
- Rohe Düse nach dem Sintern (ca. 20% Volumenschwindung)
- mittels Schleifen nachbearbeitete Düse

Damit ist es möglich, in kurzer Zeit mit einem größtmöglichen Gestaltungsfreiraum und niedrigsten Werkzeugkosten zu relativ aufwendigen und komplizierten keramischen Bauteilen zu gelangen, und das unabhängig vom Werkstoff.

Dabei wird ein gepreßtes Rohteil vor dem eigentlichen Sintervorgang in einem relativ weichen Zustand mechanisch bearbeitet.

Das erfolgt, wie aus der Metallbearbeitung bekannt, mittels Bohren, Drehen und Fräsen - jedoch aufgrund des abrasiven Materials schon mit Diamantwerkzeugen.

Nach diesem Bearbeitungsschritt wird das Teil im Ofen unter Volumenabnahme gesintert und nachfolgend bei Notwendigkeit an Funktionsflächen durch Schleifen oder andere Bearbeitungsverfahren nachbearbeitet.

Einsatzbeispiele

1. Dosierventil für die Bauindustrie

Die Entwicklung im Bereich der Klebtechnologie hat gezeigt, daß sie eine sehr wirtschaftliche und sichere Verbindungsmöglichkeit darstellt, die heute auch in sicherheitsrelevanten Bereichen angewandt wird.

So auch in der Bauindustrie, wo Volumenströme von Binder und Sand auf der einen Seite und Härter und Zement auf der anderen Seite gezielt dosiert und gefördert und erst am Ort der Klebung zusammengeführt werden.

Für dieses Bauteil wurde das **SISIC** gewählt, da es folgende Vorteile in sich vereinigt:

- hohe Härte und damit weitestgehend verschleißbeständig gegenüber Sand und Zement
- es unterliegt im Fertigungsprozeß keiner Volumenschwindung und ist damit arm an inneren Spannungen. Andere Keramiken würden bei dieser Kontur im Ofen Risse bilden oder man müßte die Kontur im Endzustand weitestgehend teuer aus dem Vollen einarbeiten.

An diesem Bauteil ist deutlich zu sehen, daß nur die notwendigen Funktionsflächen nach dem Ofenprozeß nachgeschliffen wurden.



Bild 4: Dosierventil

2. Prüfscheiben

Ein anderes Beispiel zeigt den Einsatz von Technischer Keramik in der elektronischen Bauteilprüfung. Hier werden elektrische Widerstände (die selbst aus einer abrasiven Keramik hergestellt sind!) mittels derartiger Zahnscheiben mit einem Takt von 500 min^{-1} zu einer Prüfstation transportiert.

Diese kontrolliert optisch, ob der farbige Strichcode richtig positioniert und vollständig ist. Die unterschiedlichen Farben der Scheiben sind notwendig damit die Auswerteoptik die feinen Farbunterschiede im Strichcode klar von der Umgebung unterscheiden kann.

Andere Scheiben ähnlicher Geometrie werden zum Testen der Widerstände auf Durchschlagfestigkeit verwendet.

Für beide Anwendungen wurden **SSN** und **Zirkonoxid** als keramisches Material gewählt. Die Gründe dafür sind:

- beides sind elektrische Isolatoren
- hohe Kantenstabilität (was bei Wandstärken von 0,5mm elementar wichtig ist)
- härter als die zu bewegenden Bauteile und damit ausreichend verschleißbeständig

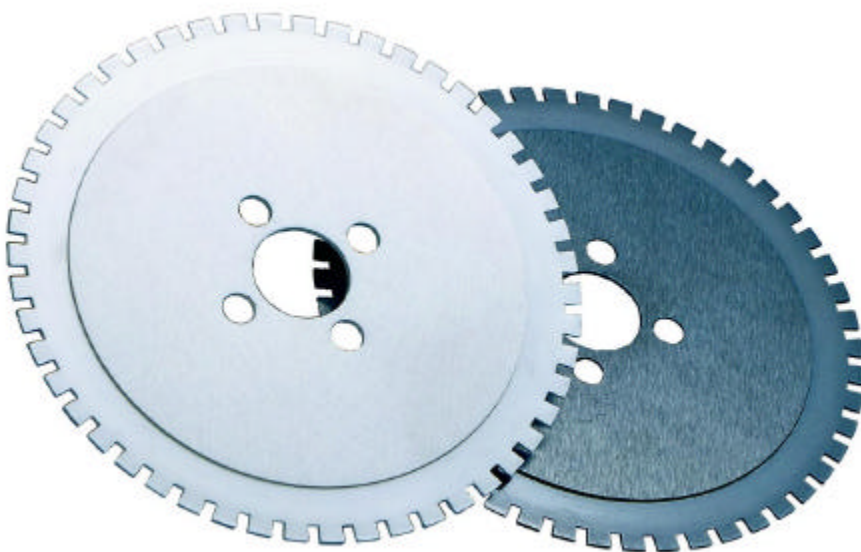


Bild 5: Prüfscheiben

Herkömmlich sind diese Scheiben aus GFK, der jedoch innerhalb weniger Wochen Verschleißerscheinungen an den Kanten und den Taschen zeigt. Diese sind wiederum wichtig zur fehlerfreien Positionierung der Werkstücke. Beim Prüfen der Durchschlagfestigkeit sind deutliche Verbrennungen am GFK zu beobachten, was ebenfalls Auswaschungen nach sich

zieht. Die Standzeit dieser Scheiben wird durch den Einsatz von Keramik um den Faktor ca. 10 erhöht.

3. Förderelemente für die wurstverarbeitende Industrie:

Jeder von uns hat schon einmal eine Wurst gegessen. Nur die Allerwenigsten wissen, was alles notwendig ist, bevor solch eine Wurstmasse in die Wursthülle gelangt.

Synthetische Wursthüllen werden industriell nach der Herstellung auf eine Rolle gewickelt. Das Einfüllen der Wurst in eine so aufgewickelte Hülle ist verfahrenstechnisch nur schwer möglich, da es zum Zusammenkleben der Hüllen und somit zu unterschiedlichen Füllungsgraden der Würste kommen kann.

Aus diesem Grund werden Wursthüllen für die Weiterverarbeitung portioniert, d.h. Einzellängen von ca. 40 mtr. werden unter Faltenbildung auf eine Länge von ca. 40 cm zu Raupen zusammengerafft.

Ein sehr wirtschaftliches Verfahren dazu ist das Raffieren mittels einer Vorrichtung, die einer überdimensionierten Schraubenmutter mit großen Flanken und einer großen Steigung ähnelt. Diese ermöglicht es, viele Meter Wursthülle zu einer möglichst kurzen Raupe zusammenzuraffen.

Dabei wird ein Rohr durch dieses sogenannte Raffelement geschoben, die Wursthülle am anderen Ende übergezogen und von innen mit Luft beaufschlagt. Durch die eingebrachte Luft wird die Wursthülle aufgebläht und damit innen gegen die Gewindeflanken gedrückt.

Durch die danach einsetzende Rotation des Raffelements mit ca. 3000 min⁻¹ wird die Wursthülle in Steigungsrichtung auf das Rohr gefördert.

Nach dem Entfernen des Rohres kann diese Raupe auf anderen Maschinen mit Wurstmasse gefüllt und zu einzelnen Würsten portioniert werden.

Um optisch eindrucksvolle Wursthüllen zu kreieren, ist diese bei manchen Wurstsorten an der Aussenseite mit abrasiven Silikaten beschichtet.

Das führt dazu, daß die Förderflanken besonders stark verschleifen und die Raupe nicht dicht genug gerafft werden kann.

Erschwerend kommt hinzu, daß bei diesem Arbeitsschritt keine Schmiermittel verwendet werden können, da die wiederum zum Verkleben der Wursthülle führen.

In der Lebensmittelindustrie zugelassene Edelstähle sind bei dieser Prozedur nach wenigen Tagen am Ende ihrer Karriere angelangt

Eine Keramik aus SSIC bringt in diesem Falle wirksam Abhilfe, da viele wichtige Eigenschaften erfüllt sind.

-Sehr verschleißbeständig

-Auch im ungeschliffenen Zustand besitzt SSIC eine sehr gute Oberflächenrauigkeit (Ra 1,5 μ m), was wiederum die Oberfläche der Wursthülle schont. Aluminiumoxid ist dabei im ungeschliffenen Zustand zu rau und erzeugt zuviel Reibungswärme.

-unbegrenzte Lebensdauer

SIC-Keramik verlängert damit die Standzeit des Bauteils auf ca. 1-2 Jahre!

Diese Aufzählung soll nur ein Auszug aus derzeit möglichen Anwendungen, die Möglichkeiten und Grenzen der Keramik verdeutlichen und zum Nachdenken anregen.

Bei Bedarf sind wir für jeden Interessenten zu einer auf sein spezielles Thema zugeschnittenen Diskussion bereit.