

Komplexe Strukturen aus Hochleistungskeramik

K. Berroth

eingereicht: 23.06.2005, überarbeitet: 01.08.2005, angenommen: 05.08.2005

Stichwörter: Hochleistungskeramik, Aluminiumoxid, Aluminiumnitrid, Siliciumcarbid, Siliciumnitrid, Zirkonoxid, komplexe Bauteile

Kurzfassung

Die Hochleistungskeramik bietet eine breite Palette von Werkstoffen an, die entsprechend ihrem spezifischen Eigenschaftspotenzial, an der richtigen Stelle eingesetzt, neuartige technische Lösungen realisierbar machen. Der Beitrag stellt ausgewählte Anwendungsbeispiele aus der Optik, der Gießereitechnik, der mechanischen und chemischen Verfahrenstechnik, der Hochtemperatur- und Wärmetechnik sowie der Elektrotechnik und Elektronik vor. Eingangs wird ein Überblick zu den Fortschritten in der Fertigungstechnik gegeben.

1 Einleitung

In vielen Bereichen der Technik stößt man mit neuen Konzepten und bei der Prozessoptimierung oft an werkstofftechnische Grenzen. Es werden neue Anforderungen an Werkstoffe gestellt. Sie müssen leicht sein, in speziellen Atmosphären korrosionsbeständig, hochsteif und dauerfest, hochrein und temperaturbeständig und... und... Dem Ideen- und Anforderungsreichtum von Konstrukteuren und Prozessingenieuren sind keine Grenzen gesetzt. Oft wird dabei versucht, die Physik und die Chemie außer Kraft zu setzen. Mit dem Einsatz von neuen Hochleistungskeramiken scheint das manchmal zu gelingen, die genaue Analyse ergibt dann, dass lediglich das Leistungsspektrum dieser Werkstoffe deutlich über konventionelle Lösungen hinausgeht.

2 Lösungsansätze und Werkstoffe

Bauteile aus Hochleistungskeramik bieten hier neuartige Lösungsansätze, weil sie allein, oder in Kombination mit anderen Keramiken und/oder anderen Werkstoffen eine völlig neue Strukturfunktionalität ermöglichen. So bieten z.B. Siliciumnitridkeramiken hohes Potenzial für Anwendungen, wo neben hoher Festigkeit und Bruchzähigkeit auch hohe Verschleiß-, Korrosions- und Temperaturwechselbeständigkeit auch bei erhöhten Temperaturen gefordert werden.

Bauteile aus solchen Werkstoffen mit erweitertem Eigenschaftsspektrum sind nun kommerziell verfügbar. Siliciumcarbidwerkstoffe sind vor allem bei höchsten Temperaturen und extremen Korrosions- und Verschleißbedingungen geeignet und bieten höchste Wärmeleitfähigkeit bei kleinem Wärmeausdehnungskoeffizienten. Sie lassen sich mit feinsten Oberflächengüte schleifen und polieren. Aluminiumoxidkeramiken sind seit Jahrzehnten an unterschiedlichsten Stellen im Einsatz, bei hohen Temperaturen, in

der Vacuumtechnik, in der Elektrotechnik und Elektronik und in der medizinischen Prothetik. Auch das Zirkonoxid ist in diesem Zusammenhang zu nennen, das sich ebenfalls in der Medizintechnik, in der Schneidtechnik und im Maschinenbau wegen seiner für Keramik schon fast extremen Festigkeit und Bruchzähigkeit einen nicht mehr wegdenkbaren Anwendungsbereich eröffnet hat.

Und last but not least muss hier auch das Aluminiumnitrid genannt werden, das vor allem in der Elektronik und der Elektrotechnik viele neuen Technologien und die weitere Miniaturisierung von Elektronikbauteilen erst ermöglicht hat. Eingesetzt wird AlN wegen der ausgezeichneten Wärmeleitfähigkeit, des höchsten – mit Ausnahme des giftigen Berylliumoxids – bei Keramiken zu realisierenden Werts. Weitere Erfolgsfaktoren sind die hohe elektrische Isolation und die gute Kompatibilität des Wärmeausdehnungskoeffizienten zu Silicium und anderen Halbleitersubstanzen.

3 Erhöhte Komplexität und Genauigkeit

Problematisch bei sehr vielen Anwendungen sind die immer komplexer werdende Geometrie der Bauteile und zusätzlich engere Toleranzforderungen. Die Herstellung komplexer, vor allem großer Bauteile, stellt besondere Anforderungen an die Herstellungsstrategie und den Herstellungsprozess. Neben der Beherrschung der Werkstofftechnik ist hier aber vor allem eine entsprechend, zuverlässige, wirtschaftliche und reproduzierbare Fertigungstechnik die Grundvoraussetzung dafür, dass neue Ideen tatsächlich umgesetzt werden können. Dass die Zuverlässigkeit der Bauteile sicherzustellen ist, wird dabei nicht mehr diskutiert. Hervorragende Ausfallwahrscheinlichkeiten von 1:1 000 000 sind keine Seltenheit. Auch die Struktur- und sogar die Farbhomogenität der Oberfläche und des Scherbens muss für viele Anwendungen mit einer Auflösung von wenigen mm bis zu einigen µm spezifiziert und gesichert werden.

Bei immer höheren technischen Anforderungen ist aber auch der Preis bei immer mehr potenziellen Anwendungsfeldern ein entscheidendes Einsatzkriterium. Deshalb muss neben der Forderung nach preisgünstigeren Rohstoffen vor allem an immer effizienteren Fertigungstechniken und zuverlässigeren Fertigungsaggregaten gearbeitet werden.

4 Fortgeschrittene Fertigungstechnik

4.1 Formgebung

Hier kommt bereits der effizienten, rohstoffschonenden Formgebung eine hohe Priorität zu.

Kontakt: Dr. Karl Berroth, FCT Ingenieurkeramik GmbH, D-96528 Rauenstein, Gewerbepark 11, E-mail: k.berroth@fct-keramik.de

Es wird zwar an vielen Techniken gearbeitet, aber als wesentliche Technologien sind immer noch die eher konventionellen im industriellen Einsatz. Bei vielen, mechanisch hoch beanspruchten Bauteilen wird ein Pressgranulat kalisostatisch oder uniaxial verdichtet, wobei die gewünschte Endkontur nahezu – oder beim Trockenpressen direkt – erreicht wird. Aus diesen Vorkörpern wird durch Zerspanung dann der Grünkörper erstellt. Neben klassischen Methoden, wie Drehen Fräsen und Bohren – heutzutage typischerweise mit NC-gesteuerten Maschinen und der CAD-CAM-Technik – kommen aber auch neue Techniken wie das Wasserstrahlschneiden zum Einsatz.

Auch das Schlickergießen mit und ohne Nachbearbeitung im Grünzustand hat einen festen Platz in der Hochleistungskeramik. Es ist das Verfahren der Wahl, wenn Bauteile mit hoher Komplexität und Größe in kleineren und mittleren Serien und etwas gröberen Toleranzen zu fertigen sind. Das Extrudieren ist für die Fertigung von Stangen, Rohren, Profilen und für Katalysatorträger und Dieselmotorenfilter eingeführt und wird serienfähig angewendet.

Spritzguss- und Folientechnik sind inzwischen als Fertigungstechniken für Massenprodukte etabliert, wobei hier nach wie vor eher nur kleine, geometrisch einfachere Bauteile gefertigt werden. Es gibt allerdings interessante Ansätze zur Herstellung von komplexen Strukturen durch Laminieren oder Verkleben von aus Folien geschnittenen oder gestanzten Laminatstrukturen.

4.2 Trocknung und Sintern

Auch für die Bauteiltrocknung und Sinterung müssen vor allem energieeffiziente Verfahren und Aggregate zum Einsatz kommen. Während sich in anderen Bereichen der Keramik kontinuierliche Prozesse und entsprechende Aggregate bereits auf breiter Front durchgesetzt haben, wird Hochleistungskeramik meist noch in diskontinuierlich arbeitenden Sinteraggregaten gesintert. Dies ist zum einen auf die sehr hohen Temperaturen und zum anderen auf komplexe Gestaltung der Gasatmosphäre zurückzuführen. Es gibt aber auch hier Ansätze zu kontinuierlichen Prozessen. Vereinzelt werden Aggregate bereits für die Produktion eingesetzt, an anderen Stellen laufen Prototypen, und für höchste Drücke und Temperaturen wird an neuartiger Anlagentechnik entwickelt.

4.3 Nachbearbeitung

Aufgrund der hohen Komplexität und der häufigen Forderung nach engen Toleranzen ist eine aufwändige Nachbearbeitung oft unumgänglich. Auch hier sind neben dem Schleifen, Läppen, Polieren, Bohren und Trennen neue Bearbeitungsmethoden und -strategien entwickelt worden und stehen vor der Anwendungsreife. Als Verfahren sind vor allem das Schneiden und Bohren zu nennen aber auch das laserunterstützte Drehen und Fräsen.

Auch das ultraschallunterstützte Bohren und Schleifen bringt, bei richtiger Anwendung, sehr große Vorteile bezüglich der Geschwindigkeit, der Oberflächengüte und der Genauigkeit. Zudem ist diese Art der Bearbeitung besonders geeignet, um spannungsarme Oberflächen zu erzeugen. Bei allen Verfahren steht eine hohe Bearbeitungseffizienz und Oberflächengüte im Vordergrund.

An vielen Stellen wird an solchen neuen Techniken geforscht und gearbeitet, wobei unterschiedliche Werkstoffe auch unterschiedliche Verfahren und Konzepte erfordern. Das Arbeiten mit Laser ist z. B. nicht bei allen Werkstoffen und Operationen gleichermaßen angebracht und geeignet. Wegen seiner hohen Temperaturwechselbeständigkeit kann Si_3N_4 z.B. sehr gut bearbeitet werden, andererseits nutzt man beim Bearbeiten von Substraten aus Al_2O_3 dessen Thermoschockempfindlichkeit, um durch Erzeugen und Weitertreiben von Mikrorissen eine Materialtrennung zu erreichen. SiC- und AlN-Keramiken lassen sich wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit nicht oder nur sehr bedingt mit dem Laser bearbeiten.

5 Prototypen als „door opener“

Realisierte Anwendungen im Prototypenmaßstab bieten meist deutliche technologische Vorteile. Oft verhindert oder verzögert der Preis solcher Lösungen und mangelnde Bekanntheit entsprechender Werkstoffe und Verfügbarkeiten deren Einführung auf breiterer Front.

Im weiteren werden Produkt- und Prozessinnovationen und Anwendungen vorgestellt, wo derzeit mit Prototypen neuartige Technologien erprobt werden bzw. wo die Fertigung und Verfügbarkeit zum standardmäßigen Serieneinsatz solcher Komponenten geführt hat und die Wirtschaftlichkeit nachgewiesen ist.

6 Produktinnovation: ultraleicht, hochsteif, dauerhaft

6.1 Anwendungen in der Optik

Für ein innovatives Kamerakonzepkt der *Fa. Carl Zeiss Optronics GmbH* sind für das Gehäuse und die dazugehörige Präzisions-Geräteträgerplattform hohe Steifigkeit, Dauerfestigkeit, kleinste Wärmeausdehnung, Ermüdungsfreiheit und gute Wärmeleitfähigkeit bei geringstem Gewicht gefordert.

Wegen hoher mechanischer Belastung bei Start und Landung der damit ausgestatteten Flugzeuge kann dieses System nur durch Verwendung von Si_3N_4 -Keramik realisiert werden.

Es mussten große und sehr komplexe Bauteile mit unterschiedlichsten Wandstärken in hoher Präzision wirtschaftlich, d.h. mit möglichst wenig Bearbeitungsaufwand nach dem Sintern, gefertigt werden. Bei *FCT Ingenieurkeramik* wurde eine auf CAD-CAM basierende, im Leichtbau übliche Technik auf die Keramik übertragen. Aus einem rohr- oder blockförmigen Halbzeug wird durch Zerspanung mit CNC-Dreh- und Fräsmaschinen das feinteilige, komplex geformte Bauteil herausgearbeitet.

Während man im Bereich der Metallverarbeitung dies mit einem gegossenen oder geschmiedeten Block tut und das Bauteil nach der Bearbeitung fertig ist, muss die Bearbeitung der Keramik unter Berücksichtigung der Schwindung beim Sintern (ca. 20 %) sowie des erforderlichen Schleifaufmaßes auf bestimmten Flächen im Grünzustand erfolgen.

Um sicherzustellen, dass nur wenige Funktionsflächen nach dem Sintern durch aufwändiges Schleifen bearbeitet werden müssen, sollte der gesamte Fertigungsprozess vom Pulver zum Bauteil so abgesichert

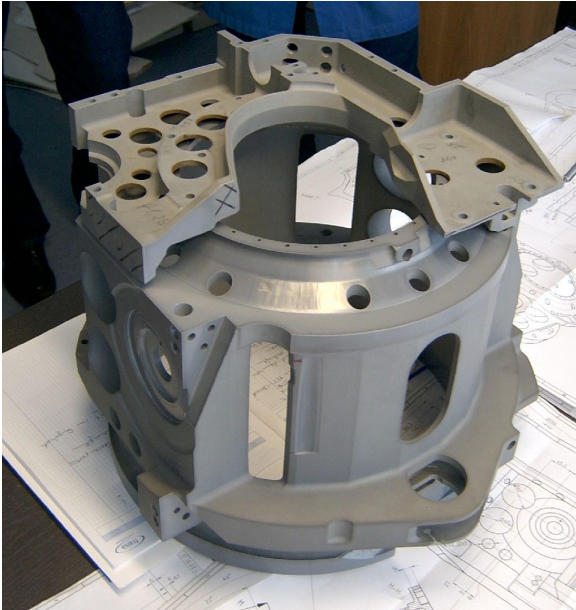


Bild 1a, b
Gehäusestruktur für
Optiken (a),
IR-Kamera bei der
Montage (b)

sein, dass die Formänderung durch Schwindung und Verzug beim Sintern mit +/- 0,2 % einzuhalten war. Dies bedeutet eine gegenüber der konventionellen Technik erhöhte Genauigkeit um fast eine Größenordnung.

Neben einer ausgefeilten Bearbeitungstechnik im grünen und gebrannten Zustand muss eine Sintertechnik auf höchstem Niveau verfügbar sein, um solche Bauteile verzugs- und rissfrei aus dem Sinterofen zu bekommen.

Die gesamte Kamera wurde aus mehreren Si_3N_4 -Komponenten und einem hochkomplexen Al_2O_3 -Bauteil – in unterschiedlicher Technik hergestellt (Bild 1 a,b) – zusammen mit einem Glaskeramikspiegel, IR-Linsensystem und unterschiedlichen Metallanbauten zu einer hochkomplexen Einheit zusammengefügt. Zudem werden noch Optiken und Messsensoren auf und an der Keramikstruktur integriert und verleihen der Gesamtapparatur eine noch höhere Komplexität und Funktionalität auf engstem Raum.

6.2 Werkstoff- und Bauteilprüftechnik

Lebensdauerprüfungen mit relevanten Lastwechselzahlen an dynamisch belasteten Maschinenkomponenten müssen möglichst schnell gehen. Um dies wirtschaftlich zu realisieren, werden Prüfgeräte mit immer höheren Prüffrequenzen gebaut. Dafür werden dauerfeste Werkstoffe und Bauteile mit wenig Masse und hohem E-Modul benötigt. Auch hier ist Si_3N_4 -Keramik sehr gut geeignet. Zusammen mit der Fa. TIRA wurden neuartige Prüfköpfe für Dauerschwingprüfmaschinen entwickelt und gebaut, die Aluminium, Magnesium und Stahl ersetzen und das Leistungsspektrum der Prüfmaschinen deutlich ausgeweitet haben (Bild 2).

Auch hier war es notwendig, hochkomplexe Strukturen mit unterschiedlicher Wandstärke bis in den Bereich unter 1 mm durch Grünbearbeitung herzustellen. Wegen der hohen Toleranzforderungen mussten viele Funktionsflächen nach der Sinterung noch geschliffen werden, wobei Wandstärken von 0,3 mm in Teilbereichen gefordert sind. Da wird dann auch Si_3N_4 schon durchscheinend und entsprechend empfindlich.

7 Prozessinnovation: korrosions- und verschleißbeständig

7.1 Aluminium-Gießereitechnik

7.1.1 Tauchheizrohre und Steigrohre beim Niederdruckguss von Aluminium

In der Aluminium-Gießereitechnik sind korrosionsfeste Werkstoffe gefragt, die in flüssigem, hochlegiertem Aluminium über lange Zeiträume beständig sind. Thermoelementschutzrohre sowie Steigrohre und Gießdüsen sind Stand der Technik, bzw. dabei, es zu werden.

Zum Warmhalten von Aluminiumschmelze werden heute neuartige Tauchheizelemente (Bild 3) verwendet, die entweder elektrisch, über Widerstände oder mit Gasbrenner beheizt, die Energie direkt in die Schmelze einkoppeln. Zum Standard durchsetzen konnten sich solche Elemente wegen der äußerst hohen Korrosionsbeständigkeit des gasdruckgesinteren Si_3N_4 , die Standzeiten von mehreren Monaten gewährleisten jedoch eine intensive Schulung der Giessereimitarbeiter im Umgang damit voraussetzt. Außerdem überzeugt die hohe Energieeffizienz dieser Tauchheizelemente, denn konventionell wird mit einem Gasbrenner auf die Oberfläche der Schmelze gefeuert. Welcher Wirkungsgrad mit dieser Technik erreicht wird, kann sich jeder vorstellen. Die effiziente Fertigung solcher Bauteile durch Schlickerguss führt zu einer verbesserten Wettbewerbsfähigkeit.



Bild 2
Kalibrierschwinger-
kopf (25 kHz),
dünnste Wandstärke
ca. 0,3 mm

Bild 3
Tauchheizelemente
in einer Filterbox

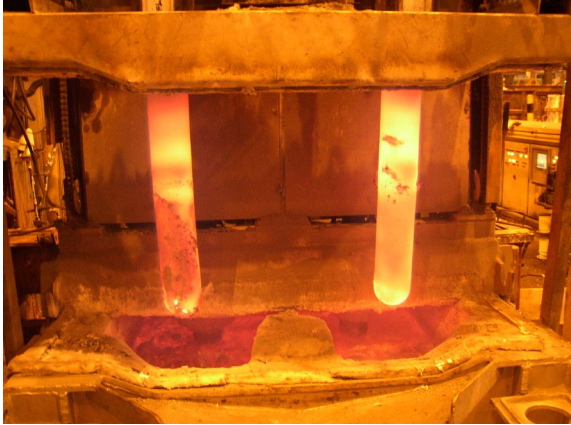


Bild 4
Steigrohre für
ND-Guss

Ähnlich positive Effekte lassen sich mit Steigrohren im Niederdruckguss (Bild 4) von Motorenbauteilen erreichen. Die Standzeiten konnten gegenüber herkömmlichen Stahlrohren um das ca. 20-fache und gegenüber Aluminiumtitanat um das 5-fache erhöht werden. Gleichzeitig kann auf aufwändiges Beschichten verzichtet werden, und zusätzlich wird die Kontamination mit Eisen durch Korrosion an Stahlrohren reduziert.

7.1.2 Schmelzepumpe

Für eine weitere Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Abformtreue, vor allem bei feinststrukturierten Gussbauteilen, sind Flüssigmetallpumpen mit hoher Dosiergenauigkeit gefragt.

Eine neuartige, patentierte Pumpe (Bild 5) der MAUCHER AG, die eingetaucht im Schmelzestiegel die Aluminiumschmelze kontaminationsfrei mit einem Druck bis ca. 10 bar und mit einer Dosiergenauigkeit von $\pm 0,1\%$ in die Form pumpt, konnte aus Si_3N_4 mit der bei FCT Ingenieurkeramik entwickelten und verfügbaren Werkstoff- und Fertigungstechnik realisiert werden. Sie wird zwischenzeitlich erfolgreich erprobt.

Bild 5
Funktionsprinzip-
skizze und Keramik-
bauteile der
Schmelzepumpe

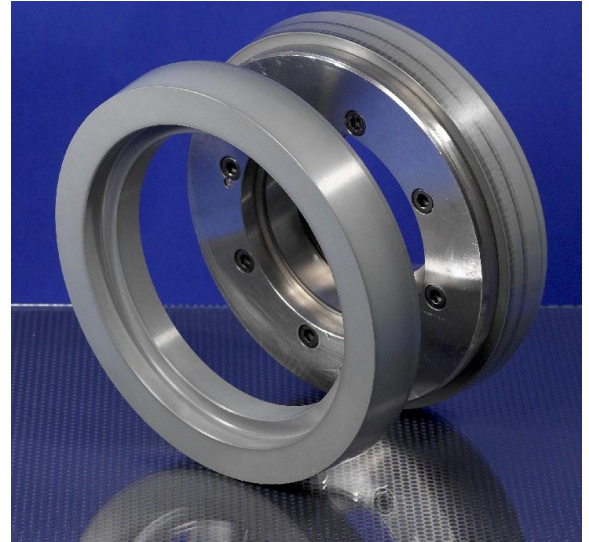


Bild 6 Streckwalzrolle, keramischer Walzring und montiertes Werkzeug, gewalzte Felgen

Hier wurde neben der Korrosionsbeständigkeit auch die Hochtemperaturfestigkeit genutzt. Für die Verbindung von Kolben und Kolbenstange über eine Kolbeneinbauplatte wurde ein „elastischer“ Seegerring aus Si_3N_4 eingesetzt. Er lässt eine ausreichende Verformung zum Einbau zu und gewährleistet auch bei hoher Temperatur eine sichere, aber lösbare Verbindung. Auch Kolbenringe für die Abdichtung des Kolbens im Zylinder wurden aus einer speziellen Si_3N_4 -Qualität hergestellt.

7.2 Metallumformung und Walzwerkstechnik

Für die Automobilindustrie werden zunehmend Komponenten durch Umformprozesse hergestellt. Werkzeuge dafür müssen hohe Standzeiten bringen und möglichst schnelle Zykluszeiten erlauben, um den Prozess wirtschaftlich und zuverlässig zu gestalten. Beim Streckwalzen von Stahlfelgen mit einem neuen Verfahren der Fa. LEICO hat die Einführung von Si_3N_4 -Streckwalzwerkzeugen dazu geführt, dass die Zykluszeit gegenüber Stahl- und Hartmetallwalzen um ca. 35 % reduziert wurde (Bild 6). Damit konnte der innovative Streckwalzmaschinenhersteller anbieten, die Fertigung der gewünschten Felgenzahl beim Räderhersteller mit nur drei Maschinen zu schaffen, während der Mitbewerber vier Maschinen benötigte.



Bild 7 Schweißkaliberrolle aus Si_3N_4

Deshalb war klar, wer den Zuschlag bekam. Zudem wurde die Standzeit der Walzwerkzeuge auf das 1,5-fache der Metallwerkzeuge erhöht und durch höhere Kaltverfestigung konnte die Materialstärke und damit das Felgengewicht um ca. 1 kg reduziert werden. Machbar ist dies wegen der hohen Härte und Verschleißbeständigkeit des Keramikwerkstoffs und dessen ausgezeichneter Temperaturwechselbeständigkeit, die die Walzradienzerrüttung durch thermomechanisch induzierte Wärmespannungsrissbildung verhindert.

Neben Bauteilen für Walzprozesse werden zunehmend auch Verschleißbauteile im Walzwerk, wie Umlenkrollen, Einführungsrollen und -ösen und andere Draht- und Bandführungselemente aus Si_3N_4 -Keramik gefertigt. Auch beim Schweißen von Rohren und Profilen wird wegen hoher Standzeit der Kaliber und damit einhergehender anhaltender Präzision Siliciumnitrid wirtschaftlich eingesetzt (Bild 7). Bei anderen Umformprozessen wie beim Tiefziehen und Thixoschmieden sind derzeit Formeinsätze und Werkzeuge in Erprobung, die aus unterschiedlichen, auf Si_3N_4 -basierenden Keramikwerkstoffen gefertigt wurden. Es wurden hierschon deutliche Standzeiterhöhungen bis zum 20-fachen bzw. von Tagen auf Monate erreicht. Als weiterer positiver Aspekt wird die Verbesserung der Produktqualität angesehen, da das Walzgut nicht mehr mit Stahl- oder Hartmetallabrieb kontaminiert wird.

7.3 Mechanische und chemische Verfahrenstechnik

Zerkleinern und Homogenisieren ist ein zunehmend wichtiger Prozess in der chemischen Verfahrenstechnik, da hier mit immer feiner dispergierten Stoffsystemen chemische Prozesse effizienter und energiesparender geführt werden können. Viele Prozesse und chemische Reaktionen sind erst möglich, wenn eine Kornfeinheit im sub- μm - oder gar nm-Bereich erreicht wird. Oft müssen auch kleinste Anteile einer Substanz mit höchster Homogenität in einer anderen verteilt werden. Für solche Prozesse wurden hocheffiziente Attritormühlen und Kalandervalzwerke entwickelt. Damit das empfindliche Mahlgut nicht erwärmt und kontaminiert wird, muss eine hohe Wärmeleitfähigkeit bei höchstmöglicher Korrosions- und Verschleißbeständigkeit bei den Konstruktionswerkstoffen für solche Aggregate gewährleistet sein. Hier haben sich vor allem SiC-Werkstoffe durchgesetzt. Es ist heute möglich, Bauteile aus gesintertem SiC zu fertigen mit



Bild 8 Spritzgusswerkzeug aus SiC

Durchmessern bis 400 mm und Längen bis 1200 mm. Aber auch Al_2O_3 , ZrO_2 und Si_3N_4 kommt hier zum Einsatz. Typische Bauteile sind geometrisch eher einfach (Bilder 9,10). So werden zylindrische Rohre als Walzmäntel für Kalandervalzwerke oder Auskleidungen in Attritoren eingesetzt. Plattenförmige Bauteile sind als Backen für Brecher im Einsatz.

Es gibt aber auch geometrisch sehr anspruchsvolle Bauteile, die mit Toleranzen im μm -Bereich bearbeitet werden müssen. Ein Beispiel dafür ist ein Spritzgusswerkzeug (Bild 8), das, je nach Art der gewählten Keramik eine sehr schnelle oder eine sehr langsame Abkühlung des Spritzteils ermöglicht. Zudem kann mit keramischen Werkzeugeinsätzen eine katalytische Reaktion verhindert werden, die mit speziellen Polymeren im Kontakt mit Metall erfolgt und die Eigenschaften des gespritzten Teils negativ beeinflusst.

7.4 Hochtemperatur- und Wärmetechnik

Ein sehr weites Feld hat sich der Keramik von jeher erschlossen: die Hochtemperaturtechnik. Hier hat die Keramik seit alters her wesentliche Vorteile gegenüber anderen Werkstoffen. Sie hält wesentlich höheren Temperaturen sowohl mechanisch als auch chemisch stand. Deshalb hat sich auch eine eigene Sparte entwickelt, die Feuerfestkeramik. Während bis vor ca. 30 Jahren hier vor allem oxidische und silicatische Werkstoffsysteme eingesetzt und erforscht wurden, kam in den 70er Jahren eine systematische Erforschung von nichtoxidischen, dichten, hochtemperaturfesten Werkstoffen dazu. Insbesondere im Zusammenhang mit der Entwicklung einer vollkeramischen Gasturbine wurden dichte, hochfeste, kriech- und korrosionsfeste Werkstoffe auf der Basis von SiC und Si_3N_4 sowie

Bild 9 (links) Siebplatte aus Si_3N_4

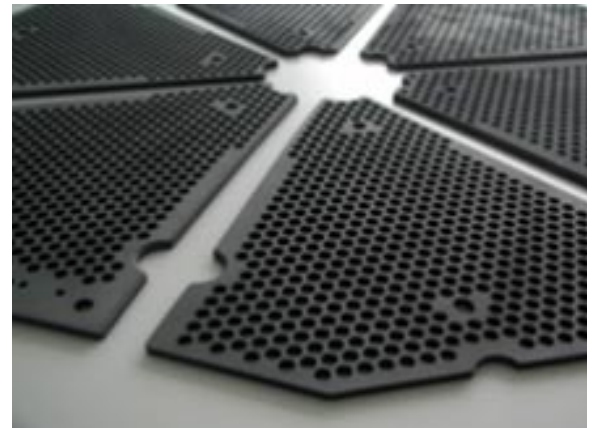
Bild 10 (rechts) Mahlkonus aus SiC





Bild 11 (links)
Mantelstrahlrohre,
Brennerdüsen und
Rekuperatoren aus
SiSiC

Bild 12 (rechts)
Spezialbrenn-
hilfsmittel aus SiSiC



entsprechende Fertigungstechniken und -aggregate entwickelt.

Das wohl weiteste Feld für diese Werkstoffe wurde in der Wärmetechnik erschlossen.

Brennerdüsen, komplexe Wärmetauscherstrukturen und großformatige Flamm- und Mantelstrahlrohre für energieeffiziente Rekuperatorbrenner und Mantelstrahlheizelemente sind dort heute nicht mehr wegzudenken (Bild 11). Sie leisten heute einen volkswirtschaftlich wichtigen Beitrag zur Energieeinsparung und zur Vermeidung von CO₂-Ausstoß.

Brennhilfsmittel, wie Balken, Rollen und Platten aus siliciuminfiltriertem SiC (SiSiC) haben dafür gesorgt, dass sich in weiten Bereichen der Keramikindustrie (Baukeramik, Fliesen, Sanitär und Porzellan) der Anteil der Brennhilfsmittelmasse am zu erwärmenden Gut deutlich reduziert hat. Noch weiter reduzieren lässt sich dieses Verhältnis mit Spezialbrennhilfsmitteln (Bild 12) aus SiSiC. Damit konnten auch hier die Besatzdichte der Energieeinsatz und der CO₂-Ausstoß sehr deutlich verringert werden. Auch die Standzeiten der Brennhilfsmittel wurden sehr stark erhöht, weil eine wesentlich bessere Korrosionsbeständigkeit durch den dichten Scherben erreicht wird. Diese Brennhilfsmittel können bei noch höheren Temperaturen eingesetzt werden als SiSiC. Hier scheint aber das Preis/Leistungsverhältnis den Einsatz auf Spezialitäten der Technischen Keramik zu begrenzen und eine breite Anwendung noch zu verhindern.

Als Beispiel, welcher Komplexitätsgrad mit der Schlickergusstechnik erreicht werden kann, ist am Beispiel der Studie eines Heißgaslüfters (Bild 13) in Modulbauweise gezeigt. Wenn die Bauteile um einen Faktor 10 kleiner wären, könnten oder müssten sie in Spritzgusstechnik hergestellt werden. Leider hat sich diese Art der Lüfterräder wegen der hohen Ausfall-

wahrscheinlichkeit der SiSiC-Keramik im Ofenbau so nicht umsetzen lassen.

8. Produktinnovationen: hochfest, isolierend, wärmeleitend

8.1 Elektrotechnik und Elektronik

8.1.1 Wärmesenken

In der Elektrotechnik und Elektronik gibt es zwei Trends. Der volumenmäßig wichtigere geht zu immer kleineren Bauteilen und damit zu immer höheren Leistungsdichten. Viele Geräte müssen deshalb effizient gekühlt werden. Da aber meist gleichzeitig noch eine gute elektrische Isolation gewährleistet sein muss, sind konventionelle Keramiken hier nicht mehr zu gebrauchen. Aufgrund seines dafür geradezu geschaffenen Eigenschaftsspektrums hat sich hier das AlN einen nicht mehr wegzudenkenden Markt geschaffen. Neben dem Einsatz von Substraten und Gehäusen mit einfacher Geometrie haben sich auch Kombinationselemente mit hochkomplexen Wärmetauscherstrukturen und integrierten Kontaktflächen sowie Bauelementen in der Leistungselektrik und -elektronik durchgesetzt. Neben der Fertigung von entsprechenden Keramikkomponenten muss hier noch eine entsprechende Verbindungstechnik zur Anbindung der Keramikühlelemente an Gehäuse, Kühlmedienkreise und an elektrische Kontakte bereitgestellt werden. Hier werden unterschiedliche Techniken wie Kleben, Löten und Spannen eingesetzt.

Ein breit gefächertes Anwendungsspektrum wurde zwischenzeitlich erarbeitet, das neben der Prototypen- und Kleinserienfertigung auch schon Großserienprodukte erreicht hat. Neben der Bahntechnik sind inzwischen auch Einsätze im Bereich der Windener-

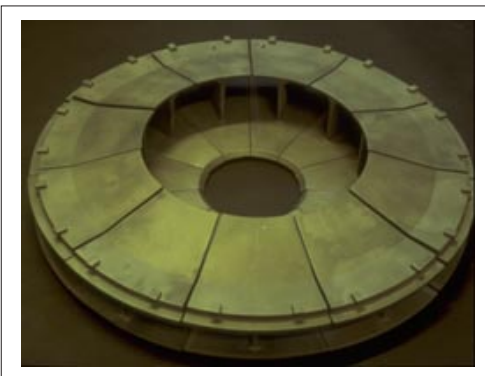


Bild 13
Heißgaslüfterrad in
Modulbauweise aus
SiSiC-Segmenten



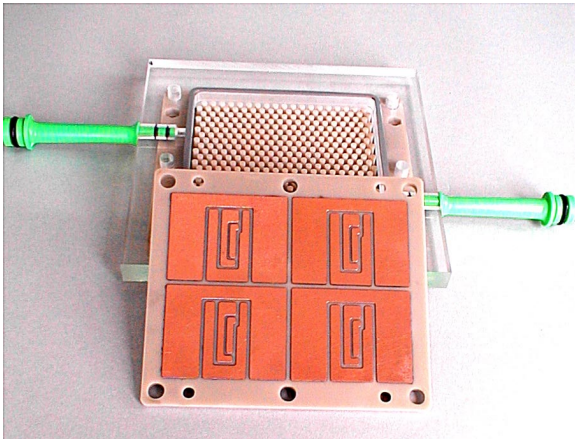


Bild 14 (links)
PINFIN-Kühler für
auf Kupfer montier-
te Leistungshalblei-
ter für Windkraftan-
lagen



Bild 15 (rechts)
AlN-Kühler mit Kup-
ferleiterbahnen zur
Montage von IGBT-
Halbleitern

gieanlagen erschlossen. In der Automobilindustrie gibt es Potenzial für Großserien.

8.1.2 Isolatoren

Technologisch Anspruchsvolleres geht zu großformatigen, komplexen und mechanisch und elektrisch hoch belasteten Komponenten in der Hochspannungstechnik und Teilchenphysik. Hier müssen mechanisch hochfeste und für höchste Spannungen durchschlagfeste, hochvakuumtaugliche Großisolatoren verfügbar gemacht werden (Bild 16).

Im Rahmen eines internationalen Forschungsverbundes wird am *Forschungszentrum Karlsruhe* gegenwärtig ein elektrostatisches Neutrinospektrometer installiert, für das zahlreiche elektrisch isolierte Bauteile notwendig sind. Auch der 300 Tonnen schwere Vakuumtank muss durch Keramik-Isolatoren für eine Hochspannung von 150 kV isoliert werden. Der größte und komplexeste Isolationskörper aus hochreinem, dichtem Al_2O_3 mit ca. 350 mm Durchmesser und einem Gewicht von 50 kg musste mit einer mechanisch stabilen und UHV-geeigneten Metall-Keramik-Verbindung in die Anlage eingebaut werden. Dabei mussten die Ausdehnungsunterschiede der verschiedenen Materialien Aluminiumoxid, Nickeleisen und Titan durch konstruktive Maßnahmen kompensiert werden.

8.1.3 Träger für die Waferbehandlung

Neben Substraten, Gehäusen für gedruckte Schaltungen (die weitestgehend aus Al_2O_3 -Keramiken gefertigt werden) und Wärmesenken aus AlN, werden aber auch zunehmend Strukturbauteile für die Waferfertigung und deren Wärmebehandlung benötigt.

Hier muss der Wärmeausdehnungskoeffizient zum Si passen, der Werkstoff soll eine möglichst hohe Festigkeit und Steifigkeit aufweisen, und er muss höchste Reinheit und Homogenität bezüglich seiner Mikrostruktur und Farbe aufweisen.

Hier bieten sich wiederum SiC und Si_3N_4 als Keramikwerkstoffe an. Dabei gibt es unterschiedliche Anforderungen. Bei Hochtemperaturprozessen, wo die Wärmeleitfähigkeit und die bessere Korrosionsbeständigkeit eine wesentliche Rolle spielen, wird eher das SiC bevorzugt, wenn es auf zuverlässige Mechanik ankommt, das Si_3N_4 . Für die mechanische Bearbeitung des 1 mm dünnen Wafers werden z.B. Scheiben aus Si_3N_4 mit 350 mm Durchmesser (Bild 17) als Träger verwendet, die mit höchster Ebenheit und Ober-

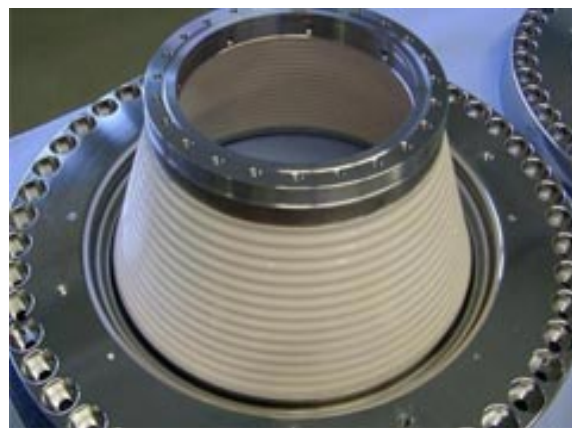


Bild 16
Messelektrodenisola-
tor aus Al_2O_3 für
Neutrinospektro-
meter, gefügt mit
500 mm Stahl-
flansch zur Anbin-
dung an die Anlage

flächengüte gewährleisten müssen, dass der Wafer (300 mm) eben bleibt und keinen noch so kleinen Kratzer durch Poren, Riefen und Partikel erhält. Für Hochtemperaturätz- und Diffusionsprozesse müssen Substrate und Halterungen äußerst korrosionsbeständig sein und eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist, um lange Standzeiten und homogene Temperaturverteilung über das gesamte Bauteil zu gewährleisten. In diesem Geschäftsbereich ist es besonders schwierig, Fuß zu fassen, weil dort meist Reinheiten im ppm- und ppb-Bereich auch für Fertigungshilfsmittel gefordert werden, die mit am Markt erhältlichen Rohstoff-

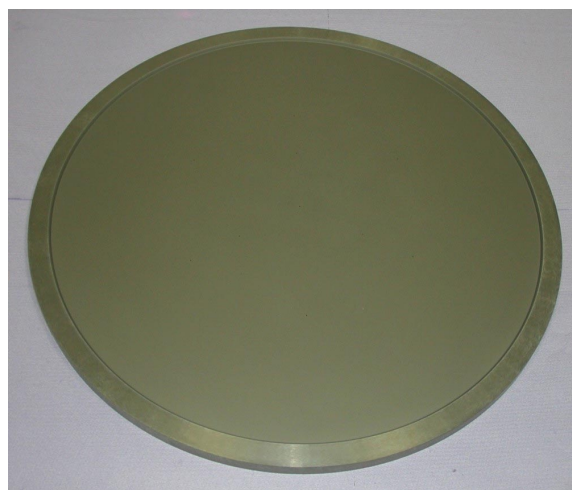


Bild 17 Substratscheibe für Waferbearbeitung

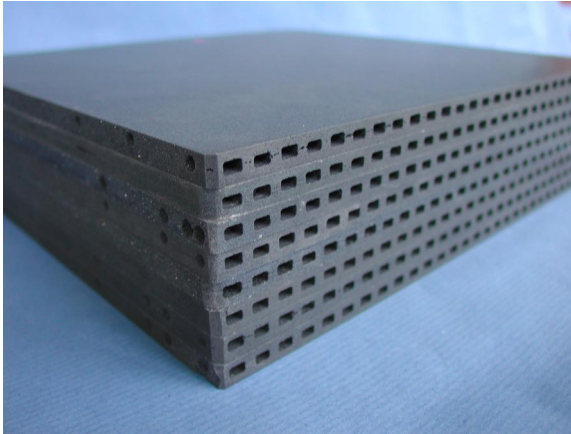


Bild 18 Kanalsetter für Multilayersubstrate

fen ohne Vorbehandlung nicht erreicht werden können. Es muss neben der eigentlichen Fertigung eine zusätzliche Reinigung von Pulvern und Produkten bereit- und sichergestellt werden.

8.1.4 Setterplatten für Multilayersubstrate

Für das Sintern von LTCC-Multilayersubstraten werden Brennhilfsmittel aus rekristallisiertem Siliciumcarbid (RSiC) verwendet.

Das RSiC ist dabei auf eine definierte Permeabilität eingestellt. Sie sind mit einer Ebenheit $< 0,02$ mm und einer Parallelität von $< 0,02$ mm auf feinste Oberflächengüte bearbeitet. Damit wird erreicht, dass die Substrate nach dem Sintern eine entsprechende Ebenheit aufweisen und frei von Oberflächenstrukturen sind.

Durch den Aufbau der Platten (Bild 18) können Heizgase durch die Kanäle bzw. Hohlräume zwischen den Auflageflächen geleitet werden, was zu einer sehr gleichmäßigen Erwärmung über die gesamte nutzbare Chargierfläche führt.

Crack- und Schwelgase, die sich beim Erwärmen aus den organischen Bindemitteln der grünen Keramikfolien bilden, können durch die im RSiC vorhandene Porosität in die Hohlräume entweichen und von dort mit den Heizgasen über einen Gaswäscher oder eine thermische Nachverbrennung (TNV) abgeführt werden. Die kompakte Bauform der Brennhilfsmittel erlaubt eine sehr hohe Besatzdichte im Ofen. Stapel bis zu 100 Lagen wurden realisiert.

Die Größe der Setter wird dabei auf die Anlagengröße bzw. auf die Substratgröße angepasst.

9 Ausblick

Hochleistungskeramik bietet eine breite Palette von Werkstoffen an, die entsprechend ihrem spezifischen Eigenschaftspotenzial, an der richtigen Stelle eingesetzt ermöglichen, neuartige technische Lösungen umzusetzen und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Anwender deutlich zu stärken. Neben den oxidischen Werkstoffen wie Al_2O_3 und ZrO_2 sind vor allem auch nichtoxidische Keramiken und neuartige Komposite für strukturelle Anwendungen in unterschiedlichsten Bereichen der Technik heute nicht mehr wegzudenken.

Da sich FCT mit Nichtoxidkeramik befasst, ist dieser Beitrag evtl. etwas SiC- und Si_3N_4 -lastig. Um aber aktuelle Beispiele zu zeigen, kann im wesentlichen nur auf Bauteile aus Eigenfertigung zurückgegriffen werden. Sicher gibt es auch hervorragende Beispiele aus Oxidkeramik, aber hier sind oft – wie auch bei FCT – Veröffentlichungssperren des Kunden verfügbar, da sonst neueste Technologien zu früh publik gemacht werden könnten. Zum anderen geben uns unsere Mitbewerber selten Einblick in die aktuell laufende Fertigung von anspruchsvollen Komponenten. Die spektakulärsten und komplexesten Strukturen, an denen heute bei uns Keramikherstellern geforscht und gearbeitet wird, müssen deshalb leider unerwähnt bleiben.

Mit SiC- und Si_3N_4 -Keramikwerkstoffen und der entsprechenden Fertigungstechnik sind Bauteile aus einer Werkstoffklasse kommerziell verfügbar, die, wie andere Hochleistungskeramiken auch, spezielle Produkt- und Prozessinnovationen erlauben und damit neuartige Geräte, Anlagen und Prozesse erst möglich machen. Die Keramikbranche leistet damit auch einen wesentlichen Beitrag zur Sicherstellung der Innovationsfähigkeit der deutschen Industrie im internationalen Wettbewerb. Das Potenzial ist noch nicht ausgeschöpft, und es werden fast täglich neue Referenzen geschaffen. Zudem wird bei der *FCT Ingenieurkeramik GmbH* wie auch bei anderen Keramik Anbietern systematisch an der Werkstoff- und Verfahrenstechnik weiter geforscht und entwickelt, um neue Eigenschaftskombinationen, höhere Zuverlässigkeit und wirtschaftlichere Bauteile zum erweiterten Anwendernutzen in der industriellen Praxis umsetzen zu können.

Dank

Bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei den Firmen: *AnCeram, Carl Zeiss Optronics, Drache Umwelttechnik, Friatec, Leico, Maucher, Schunk Ingenieurkeramik, Silca* und *Tira* für die Freigabe des verwendeten Bildmaterials.