

## BEDEUTUNG UND CHANCEN NICHTMETALLISCH-ANORGANISCHER WERKSTOFFE

E. GUGEL

Forschungsinstitut der Cremer-Gruppe (CFI), P.O.Box 1380,  
D-8633 Rödental (Germany)

### ABSTRACT

Der älteste von Menschenhand hergestellte Werkstoff erlebt zur Zeit eine bemerkenswerte Renaissance. Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe stellen zwar seit jeher einen durchaus bedeutenden Wirtschaftsfaktor im Bereich des Bauwesens, der Tischkultur, aber auch der Technik als hitzebeständiges Ofenbaumaterial und als Werkstoff für die Elektrotechnik dar, hatten aber bisher im Bereich des Maschinen- und Apparatebaues nur in begrenzten Fällen eine Anwendung gefunden. Gerade in diesem Bereich sowie in neuen elektrotechnischen Anwendungen und in der Humanmedizin eröffnen sich aber nun neue Möglichkeiten.

Es wird ein Bericht gegeben über die Hintergründe dieser Entwicklungen und den derzeitigen Stand. Es wird auch kurz auf die Bedeutung thermoanalytischer Methoden für Entwicklung, Herstellung und Anwendung nichtmetallisch-anorganischer Werkstoffe eingegangen.

### 1. EINFÜHRUNG

Die Einstellung zu den nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffen, zu denen vor allem die Keramik zählt, ist zur Zeit in einem bemerkenswerten Wandel begriffen. Sie dringen zunehmend in Bereiche vor, in denen sie noch vor kurzer Zeit kaum vorstellbar waren. Bei dem Versuch einer Beurteilung dieser Situation ist allerdings eine gewisse Vorsicht am Platze, da in den Medien die angemessene Sachlichkeit oft durch spekulative Darstellungen unterdrückt wird. Aber auch bei realistischer Einschätzung ist durchaus festzustellen, daß selbst die Diskussion zu einem "keramischen Motor" aus dem Bereich der Utopie herausgetreten ist. So kann der älteste Werkstoff der Menschheit auch jener der Zukunft sein.

Die Werkstoffentwicklung, obwohl Voraussetzung für die Entwicklung einer verbesserten oder neuen Technik, wird im allgemeinen von der Öffentlichkeit wenig beachtet. Sie ist aber jetzt herausgetreten aus dieser geringen Beachtung, vor allem seitdem keramische Werkstoffe in der Automobiltechnik diskussionsreif wurden, da das Kraftfahrzeug in unserer derzeitigen Welt, vielfach ohne rationale Gründe, einen zentralen Platz einnimmt. Ganz besonders spektakulär

ist diese Situation in Japan, wo die Keramik gewissermaßen zum nationalen Anliegen wurde (1).

Aber selbstverständlich ist der Anwendungsspielraum nichtmetallisch-anorganischer Werkstoffe nicht auf das Kraftfahrzeug beschränkt, sondern für alle technischen Sparten interessant. Es sei nur hingewiesen auf die wachsende Bedeutung der Mikroelektronik, die mitverursacht wird durch die Leistungsfähigkeit der hier benötigten nichtmetallisch-anorganischen Isolierwerkstoffe. Dazu kommt noch, daß in zahlreichen Ländern - vor allem in USA und Deutschland - relativ großzügige staatliche Förderungsprogramme existieren (2), welche die Industrie zu erhöhtem entwicklungs-mäßigem Engagement motivieren sollen.

So ist die Kenntnis über die Möglichkeiten, welche nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe für unser Leben beinhalten, immer mehr in das Bewußtsein der Allgemeinheit gerückt, um sich doch auch einmal vom Aschenbecher- und Gartenzwerg-Image zu lösen.

## 2. HINTERGRÜNDE

Die Gründe beziehungsweise die Triebkräfte für das Einsetzen dieser Entwicklung sind vielseitig. Zunächst verlangt natürlich die Technik immer nach verbesserten Verfahren, wie z. B. nach leistungsfähigeren Motoren oder es werden neue Verfahren entwickelt, wie z. B. für die direkte Stromerzeugung. Es zeigt sich schon seit einigen Jahren, daß zur Ermöglichung dieser Fortschritte die metallischen Werkstoffe nicht mehr geeignet sind. Sie haben ihre Grenzen in mancher Hinsicht bereits erreicht, so daß nun die speziellen Eigenschaften der keramischen Werkstoffe in das Blickfeld des Interesses rücken. Die wesentlichen hier interessierenden und auszunützensden Eigenschaften und ihre Bedeutung sind kurz in Tabelle I aufgelistet.

Des weiteren haben die modernen Möglichkeiten zur Beschreibung eines Werkstoffes vom Pulver über das Werkstoffgefüge bis zu den speziellen Betrachtungsweisen spröder Materialien im Hinblick auf ihre Lebensdauer (3) die nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffe in einen Entwicklungsstand gebracht, der ihren Einsatz auch im Maschinenbau trotz des Nachteilcs der Sprödigkeit ermöglicht. Die werkstoffliche Entwicklung ist allerdings erst der eine Schritt; der nächste ist die Realisierung der optimierten Eigenschaften in einem Bauteil, wozu erst die modernsten Einrichtungen zur Formgebung und zum Sintern die Basis geben.

Von besonderer Bedeutung für den gesicherten Einsatz der sprödekeramischen Produkte ist die Anwendung zerstörungsreier Prüfverfahren zur Aufdeckung von örtlichen oder integralen Fehlern. Auch hier ist bereits ein durchaus beachtlicher Entwicklungsstand zu erkennen (4).

Der Einsatz von Keramik im Maschinenbau könnte nicht realisiert werden, wenn nicht angepaßte Konstruktionsgrundlagen zu schaffen sind. Da jede örtliche Überspannung sofort zum katastrophalen Ausfall führt, ist es erforderlich, unter sämtlichen möglichen Einsatzbedingungen die Orte maximaler Spannung kennenzulernen. Die dazu erforderlichen aufwendigen und langwierigen Finite-Element-Berechnungen waren erst durch den Fortschritt in der Computertechnik möglich. Damit erst ist der Weg zum keramikgerechten Konstruieren geöffnet worden.

Und schließlich sind als Triebfedern noch wirtschaftliche und ökologische Gründe zu nennen:

Vor dem Hintergrund des wirtschaftlichen Umganges mit unseren Energiequellen sind Weiterentwicklungen oder Neuentwicklungen von Wärmekraftmaschinen, die bei höherer Temperatur und dadurch mit besserem Wirkungsgrad arbeiten, erstrebenswert. Auch benötigen keramische Bauteile selbst nur etwa halb so viel Energie zu ihrer Herstellung wie vergleichsweise Superlegierungen (5). Schließlich sind die Rohstoffe für die Keramik auf der ganzen Erde fast unbegrenzt vorhanden, so daß hier auch aus strategischen Gründen kaum mit Problemen der Versorgung gerechnet werden muß, wie es aber durchaus der Fall sein kann bei den seltenen Legierungselementen metallischer Hochleistungswerkstoffe (6). Auch von der Umweltbelastung her bringt die Keramik Vorteile gegenüber den Metallen, bei deren Herstellung aus den Erzen der hohe Anteil des mit abzubauenden, zu bewegenden und aufzuarbeitenden Abraums eine deutlich größere Umweltzerstörung bewirkt.

### 3. ANWENDUNGSBEREICHE

Das, was man zur modernen Keramik, welche mit den verschiedensten Namen, wie Hochleistungskeramik, fortgeschrittene Keramik, Ingenieurkeramik und anderen belegt ist, wurde in der einer japanischen Arbeit (7) entnommenen und ergänzten Tabelle II sehr gut zusammengestellt. Die Einteilung erfolgt hier nach den Funktionen, die primär der jeweilige Werkstoff zu erfüllen hat, gefolgt von typischen Gruppierungen mit Werkstoffangaben und dazu gehörenden Beispielen.

Man sieht hier die ungewöhnliche Vielfalt, welche mit Sicherheit zur Zeit noch gar nicht voll ausgeschöpft ist.

Eine verhältnismäßig weit verzweigte Gruppe ist die Elektro- und Magnetkeramik, welche auf der Basis zahlreicher unterschiedlicher elektrischer Eigenschaften beruht. Diese Gruppe stellt weltweit eine Umsatzgröße von über 7 Milliarden DM p. a. dar, wobei die schon zur klassischen Keramik zählenden Porzellan- und Steatit-isolatoren, sowie die Zündkerzen nicht eingeschlossen sind. Die Hauptgruppen sind die Kondensatorwerkstoffe, die Ferrite und die erst in den letzten Jahren als Folge der Entwicklung auf dem Gebiet der Mikroelektronik enorm an Bedeutung gewonnenen Substrate (IC-Packages). Zu erwähnen sind hier weiterhin die piezokeramischen Produkte (elektromechanische Wandler, z. B. für Ultraschallanlagen) sowie die keramischen Halbleiter, welche als temperatur- oder spannungsabhängige Widerstände z. B. für den Einsatz als Sensoren eine zunehmend wichtige Rolle in allen automatisierten technischen Einrichtungen spielen.

Die Ionenleitenden Keramikmaterialien haben in Form des Zirkonoxides für Sauerstoffpotentialmessungen bereits Bedeutung erlangt, während dieses Material als Hochtemperaturbrennstoffzelle (8) und das Natriumaluminat ( $\beta$ -Aluminiumoxid) als Festkörperelektrolyt für die Natrium-Schwefel-Batterie (9) nicht vom Material her, sondern von den anwendungstechnischen Systemen her im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium stehen. Man erwartet ein mit dieser Batterie ausgestattetes Elektroauto auf der Straße innerhalb der nächsten Jahre. Diese Entwicklungen hängen ganz wesentlich von der Qualität der Keramik und von ihrer reproduzierbaren Herstellung in den erforderlichen Formen ab.

Die nächste in Tabelle II dargestellte Funktion beinhaltet die keramischen Magnetwerkstoffe (Ferrite), welche sowohl aufgrund ihrer besseren Eigenschaftskombination als auch ihres günstigeren Preises die metallischen Magnete weitgehend abgelöst haben.

Unter den optischen Funktionen ist das transparente Aluminiumoxid für die Natriumdampflampe sicher vom Umfang das gewichtigste Produkt. Interessant ist die keramisch-stoffliche Entwicklung, nämlich, daß durch geeignete Gefügekorngrößen mit minimierter Korngrenzphase und Porosität bei den meisten Oxiden, soweit sie rein darstellbar sind, eine Transparenz erreicht werden kann. So öffnet sich hier auch der Weg für weitere Anwendungen, wie z. B. Fenster für Infrarotlicht. Eine spezielle optische Funktion erfüllen die licht-

speichernden Elemente auf der Basis der lanthanmodifizierten Blei-Zirkonattitanate (PLZT).

Auch unter den chemischen Funktionen sind zunächst verschiedenartige Sensoren zu nennen, welche zweifelsohne im Zusammenhang mit der Bewältigung von Umweltproblemen an Bedeutung gewinnen werden. Eine zur Zeit im Vordergrund stehende Rolle spielt hier der Träger (meistens wabenförmiger keramischer Körper) für Katalysatoren zur Entfernung von unverbrannten Anteilen und Stickoxiden im Abgas und zwar sowohl für Kraftfahrzeuge als auch für stationäre Anlagen, wie Kraftwerke.

Im Bereich der mechanischen Funktionen ist das Angebot an Werkstoffen und Produkten außerordentlich breit, auch wenn die Gesamtumsatzgröße noch bei weitem nicht an jene der elektrokeramischen Produkte heranreicht.

Die Aluminiumoxid-Schneidkeramik ist seit vielen Jahren etabliert. Für bestimmte Anwendungen erlaubt sie deutlich höhere Drehgeschwindigkeiten und einen dickeren Span als metallische Schneidwerkzeuge. Die Entwicklung dichter Siliziumnitridsorten in jüngster Zeit hat zu neuen Schneidkeramiken mit noch weiter verbesserter Leistungsfähigkeit in bestimmten Einsatzbereichen (Superlegierungen, Gußeisen) geführt.

Das Spektrum des Einsatzes, wo besondere Beständigkeit gegen Korrosion und Erosion erforderlich ist, ist außerordentlich breit (10), denn den Verschleiß mindern bedeutet längere Lebenszeit und relativ kürzere Betriebsunterbrechungen. Etabliert hat sich die Keramik bereits als Dichtring in modernen Gleitringdichtungen, und zwar in Form von Aluminiumoxid und siliziumhaltigem Siliziumkarbid. Hier kommt es auf exakteste Oberflächenbearbeitung und günstige tribologische Eigenschaften an. Ein weiterer nun aufstrebender Bereich ist der Einsatz von Oxid- und vor allem auch Nichtoxidkeramik als Sitz und Kegel in Ventilen, z. B. für extreme Druckreduktion unter starken korrosiven und abrasiven Bedingungen. Die Haltbarkeit solcher Aggregate gegenüber Metallbauteilen konnte in vielen Fällen extrem verlängert werden. Erwähnt seien noch Kugel- und Gleitlager, Wellenschutzhülsen, Schneidleisten, Brennereinbauten, Wärmetauscher, z. B. für Solaranlagen (11) und Armaturenbauteile wie für Warmwassermischventile.

Von besonderem allgemeinem Interesse ist aber der Einsatz von Keramik im Hubkolbenmotor, vor allem im Diesel. In Tabelle III sind die interessierenden Bauteile zusammengestellt und die mit

ihnen zu erwartenden Vorteile. Der grundsätzliche Beweis für diese Vorteile wurde am Prüfstand und auf der Straße bereits erbracht.

Der "Keramikmotor" wurde bereits Ende der sechziger Jahre in England in einem 1-PS-Prototyp vorgeführt und existiert nun in einigen Versionen vor allem in Japan. Der Weg bis zu seinem kommerziellen Durchbruch kann nicht klar vorgezeichnet werden, da zweifelsohne zahlreiche konstruktive und materialtechnische Probleme noch zu lösen sein werden. Die Entwicklung wird nicht spontan sondern Schritt für Schritt vor sich gehen.

Bei aller angebrachter Vorsicht hier eine Prognose zu stellen, ist doch damit zu rechnen, daß die Keramik den Motor der Zukunft effektiver, leichter, leiser und umweltfreundlicher machen wird. Ein wärmeisolierter Motor braucht ein System, welches den höheren Wärmehalt seines Abgases ausnützt. Dies ist z.B. der Abgasturbolader, der in den letzten Jahren in steigendem Maße Einsatz gefunden hat. Seine beste Wirkung erreicht er bei hoher Drehzahl des Rotors. Ein niedriges Gewicht desselben bedeutet ein kleineres Massenträgheitsmoment und verspricht damit ein rascheres Ansprechen. Dies spricht für eine keramische Ausführung des Rotors, an der weltweit intensiv gearbeitet wird. So wurde in Japan und nun auch in den USA bereits für das nächste Jahr die Serienfertigung keramischer Abgasturbolader-Rotoren angekündigt.

Als Werkstoff etabliert sich gesintertes Siliziumnitrid neben gesintertem Siliziumkarbid. Die maximal erforderliche Umfangsgeschwindigkeit von 500 m/min ist zwar noch nicht erreicht, trotzdem will man aber in Japan auch mit einer geringeren Leistung auf den Markt kommen, um sowohl im praktischen Einsatz als auch in der Herstellung dieses komplizierten Teiles Erfahrungen sammeln zu können.

Die Gasturbine, welche in Deutschland in der Keramikversion seit zehn Jahren staatlich gefördert wird (12) hat als Antriebsaggregat bedeutende Vorteile, wie geringe Schadstoffemission, kontinuierliche Verbrennung - dadurch relativ einfache Bauart mit weniger Einzelteilen - und die Vielbrennstofffähigkeit. Jedoch die Bauteile sind kontinuierlich der hohen Temperatur ausgesetzt, welche von metallischen Werkstoffen nur bis ca. 1300 K ausgehalten wird. Bei dieser Arbeitstemperatur ist aber kein höherer thermischer Wirkungsgrad zu erreichen als der Hubkolbenmotor ihn bereits besitzt. Der Einsatz von Keramik bietet hier also die Chance einer besseren Wirtschaftlichkeit, da sie deutlich höhere Betriebstemperaturen zuläßt. Dies ist an stationären Teilen in Tests von über 500 Stun-

den bereits erfolgreich bewiesen worden. Auch die Gasturbine benötigt ein Aggregat zur Ausnützung der Abwärme, in diesem Fall einen Wärmetauscher, der aus einem silikatkeramischen Wabenkörper hergestellt wird und sich im Dauertest bis über 5000 Stunden bereits bewährt hat. Die kritischste Komponente ist zweifelsohne der Rotor, der nur aus der hochfestesten Keramik (heißgepreßtes Siliziumnitrid) herzustellen ist, was bei der Komplexheit dieses Bauteiles in Einzelherstellung zwar möglich, in der natürlich für die Zukunft erforderlichen Serienfertigung noch zu entwickeln ist. Der Rotor hat in einem kürzlich vorgeführten Daimler-Benz-Versuchsauto seine Feuerprobe erfolgreich überstanden.

Schmerzfreie und langlebige Lösungen in der Medizinaltechnik zu entwickeln, ist zweifelsohne ein erstrebenswertes Ziel. Auf diesem Wege befindet sich die Biokeramik (13). Tabelle IV zeigt eine Übersicht über die in Frage kommenden Werkstoffe und ihre Charakterisierung. Danach kann Knochengewebe nur an Titan und Aluminiumoxidkeramik eng heranwachsen, welche auch beide genügend Festigkeit für Prothesenkonstruktionen bieten. Die bezüglich ihrer Bindung am Knochen sich am günstigsten verhaltenden bioaktiven Materialien - durchwegs nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe - haben leider keine ausreichende Festigkeit, so daß sie bisher nur als Überzüge oder als unbelastete Platzhalter einzusetzen sind.

Hüftgelenkendoprothesen aus Aluminiumoxidpfanne und -kugel und metallischem Zapfen sowie Zahnwurzelimplantate aus Aluminiumoxid befinden sich schon seit mehreren Jahren im Einsatz und lassen sehr positive Perspektiven erkennen.

Die Konstruktion dieser Implantate richtet sich nach biomechanischen Gegebenheiten, um ein optimales Anwachsen des natürlichen Knochens zu gewährleisten.

Zur Vervollständigung der Palette der modernen nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffe sind noch Materialien zu erwähnen, welche bei der Kernkraftgewinnung eingesetzt werden. Es sind dies die keramischen Brennstäbe selbst, gewisse Abschirmwerkstoffe und Baustoffe für die Konstruktion. Diese stellen ebenfalls ein recht interessantes Potential dar, welches - aber wohl erst in ferner Zukunft - durch Keramiken ergänzt werden wird, die für den Kernfusionsreaktor erforderlich sein werden.

#### 4. WERKSTOFF-EIGENSCHAFTEN

Die für den mechanisch orientierten Einsatz, also im Maschinenbau, in Frage kommenden Werkstoffe sind mit ihren wesentlichen Eigenschaften, welche für ihre jeweilige Auswahl bestimmend sind, in Tabelle V zusammengestellt. Von besonderem Interesse ist natürlich in den meisten Fällen eine ausreichende Festigkeit. Als Folge gezielter Gefüßmaßnahmen sind hier beachtliche Fortschritte erzielt worden. Dies trifft einerseits auf das dichte Siliziumnitrid zu, welches durch eine gewisse Gefüßverzahnung und einen relativ niedrigen Elastizitätsmodul auch eine bemerkenswerte Zähigkeit besitzt. Des weiteren fällt das Zirkonoxid bezüglich seiner herausragenden Festigkeit auf. Diese wird bewirkt durch einen metastabil gehaltenen Anteil an tetragonaler Kristallmodifikation. Während des Bruchvorganges erfolgt eine spontane Umwandlung und Rißverzweigung, wodurch die Festigkeit und auch die Bruchzähigkeit positiv beeinflußt wird. Dieser Effekt ist allerdings nur auf recht niedrige Temperaturen beschränkt.

Nach der bekannten Beziehung von Griffith wird die Festigkeit eines Materiales bestimmt von der Größe der vorhandenen Risse, der Oberflächenenergie und dem E-Modul. Da letzterer kaum beeinflußt werden kann, führt der Weg zur Verbesserung der Festigkeit einerseits über die Verkleinerung der Risse, - d. h. also homogene und feinkörnige Rohstoffpulver und ihre Formgebung und Sintern zu feinem homogenem Gefüße - oder über Erhöhung der Brucharbeit durch Einflußnahme auf die Oberflächenenergie, wie oben am Beispiel des Zirkonoxids aufgezeigt wurde. Dies ist jedoch nur bei wenigen Systemen möglich, wobei der Effekt auch durch Einbau von Zirkonoxid, z. B. in Aluminiumoxid (Dispersionskeramik) erreicht werden kann.

Da der Einsatz eines Bauteiles über eine gewisse Dauer erfolgen soll, ist die Festigkeit nicht nur nach kurzer Zeit interessant sondern es muß das Festigkeitsverhalten über die Zeit unter den gegebenen Einsatzbedingungen beachtet werden. Zusätzlich ist zu beachten, daß die Festigkeit eines nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffes wegen seiner Sprödigkeit, d. h. wegen seiner Abhängigkeit von der jeweiligen den Bruch auslösenden Rißgröße einer relativ starken Streuung unterliegt, welche in konstruktive Überlegungen eingehen muß. Zur Kennzeichnung der Streuung hat sich die Weibull-Statistik ausgezeichnet bewährt. Diese und die moderne Bruchmechanik erlauben es auf der Basis eines gewissen Versuchsumfanges



Lebensdauerdiagramme zu berechnen, welche die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers in Abhängigkeit von Zeit und Belastung voraussagen.

## 5. TECHNOLOGIE

Diese Werkstoffe sind in einer gesicherten Fertigung in Produkten zu realisieren, um in wirtschaftlicher Weise in die angestrebten Anwendungsbereiche eindringen zu können.

Alle technologischen Verfahrensschritte beeinflussen das Endergebnis, das ist ein Material mit optimalem, nach Möglichkeit maßgeschneidertem Gefüge, mit homogener Qualität in verlässlichen und kostengünstig herzustellenden Produkten.

Maßgebend sind vor allem das feine homogene Pulver ohne Agglomerate, eine Formgebung, welche diese Homogenität nicht zerstört, ein Sintern zu höchster Dichte bei niedriger Temperatur, bei der das Kornwachstum noch eine untergeordnete Rolle spielt und gegebenenfalls eine angepaßte Oberflächenbehandlung durch Schleifen. Erzielte Festigkeitsspitzenwerte weisen zwar auf die Kapazität des Werkstoffes hin, in der Breite einer Fertigung sollte man aber besser die gesicherte Einhaltung eines niedrigeren aber gesicherten Niveaus mit geringer Streubreite anstreben, denn nur damit kann der Konstrukteur für seine konkrete konstruktive Anwendung etwas anfangen.

## 6. EINSATZ THERMOANALYTISCHER METHODEN

Bei allen diesen werkstofftechnischen Entwicklungen spielen natürlich thermomechanische Untersuchungen, wie Langzeitfestigkeit bei hoher Temperatur, elastische Eigenschaften und Kriechverhalten sowie thermophysikalische Methoden eine bedeutende Rolle.

Tabelle VI zeigt einige typische Fälle, in denen der Einsatz der Differentialthermoanalyse, Thermogravimetrie und Dilatometrie erforderlich ist. Zur Charakterisierung von Rohstoffpulver ist die DTA und die TGA ein wertvolles Hilfsmittel. In der Formgebung ist das Spritzgießverfahren gerade für eine Serienfertigung eine besonders attraktive Methode. Der Nachteil dieses Verfahrens ist der langwierige Ausheizprozeß der temporären Plastifizierungsmittel, der mittels TGA verfolgt werden kann. Beim Einsatz nichtoxidischer Pulver ist zusätzlich zu beachten, daß die Bindemittelentfernung in oxidierender Atmosphäre unterhalb jener Temperatur stattfindet, bei der bereits eine Oxidation stattfindet. Zum Studium des Oxidationsverhaltens für diesen speziellen Fall, aber auch

von Fertigprodukten, welche in oxidierender Atmosphäre eingesetzt werden sollen, ist die TGA das geeignetste Instrument.

Eine besondere Methode der Herstellung von Nichtoxidkeramiken ist das Nitridieren von Siliziumnitrid, welches zum reaktionsgesinterten Siliziumnitrid führt. Das Nitridierverhalten eines Silizium-Rohstoffes unter verschiedenen Randbedingungen bestimmt das Gefüge und damit die Eigenschaften des Produktes. Beim Studium dieser Verhältnisse erfüllt ebenfalls die TGA eine wichtige Aufgabe.

Für das Studium des Verhaltens verschiedener Pulver beim Sintern ist die Verfolgung der Schwindungsvorgänge im Dilatometer, welche auf Schwindungs- und damit Sintergeschwindigkeit umgerechnet werden, ein wertvolles Hilfsmittel um einerseits die Entwicklung geeigneter Pulver zu unterstützen und andererseits die Temperaturführung beim Sintern von Bauteilen geeignet zu steuern. Ebenfalls im Dilatometer kann das Umwandlungsverhalten von Werkstoffen studiert werden, welche einen Bestandteil enthalten, der temperaturabhängige Modifikationsänderungen erleidet, wie z. B. Quarz oder Zirkonoxid. Schließlich ist die Bestimmung der Wärmedehnung als eine für den Einsatz wesentliche und charakterisierende Eigenschaftsgröße bedeutungsvoll, und zwar einseits als Grundlage für die optimale Anpassung des keramischen Bauteiles zu dem üblicherweise gegebenen metallischen System und andererseits bezüglich der primären Abhängigkeit der Temperaturwechselbeständigkeit eines Materiales von seiner Wärmedehnung.

So liefern auch die thermophysikalischen Methoden einen durchaus nicht unbedeutenden Beitrag zu den vielseitigen Bemühungen, nicht-metallisch-anorganische Werkstoffe materialmäßig, produktions- und anwendungstechnisch zu entwickeln, um ihre interessanten Eigenschaften zur fortschrittlichen Lösung zahlreicher Probleme der Technik besser auszunutzen.

#### LITERATUR

Die hier angegebenen Literaturhinweise sollen nur die Möglichkeit zu einer etwas weiterführenden Information geben. Eine vollständigere Literaturübersicht ist bei der Breite des Themas natürlich nicht möglich.

- 1 High Performance Fine Ceramics in Japan, Science and Technology in Japan, 2, 1983, 8, 16-21.
- 2 J. I. Mueller, Handicapping the World's Derby for Advanced Ceramics, Am. Cer. Soc. Bull. 61, 1982, 588-590.

- 3 E. Gugel, H. A. Lindner, G. Leimer, Zur Langzeitfestigkeit von reaktionsgesintertem Siliziumnitrid, cfi-Berichte der DKG, 1984, im Druck.
- 4 K. Goebbels, H. Reiter, W. Arnold, S. Hirsekorn, Ein Konzept zur Qualitätssicherung von Bauteilen der Keramik-Gasturbine durch zerstörungsfreie Prüfverfahren, 3. BMFT-Status-Seminar: "Keramische Bauteile für Fahrzeug-Gasturbinen", Springer-Verlag, 1984, im Druck.
- 5 R. W. Davidge, in Nitrogen Ceramics, F. Riley, Ed. Nordhoff, Leyden, 1977, 653-657.
- 6 H. B. Probst, Substitution for High Temperature Alloys, Am. Cer. Soc. Bull. 59, 1980, 206-210.
- 7 "New Ceramics Market in Japan", Yano Research Inst., Ltd. (1982)
- 8 A. O. Isenberg, Cell-Performance and Life Characterisation of Solid Oxid Electrolyt Fuel Cell, Proceedings of the Conference on High Temperatures Solid Oxid Electrolyt 1, 1983, 4.
- 9 W. Fischer, Weiterentwicklung der Elektrospeicher für Fahrzeuge, Energiewirtschaftl. Tagesfragen, 12, 1982, 1063.
- 10 E. Gugel, H. Wahl, Anwendung von Siliziumnitrid- und Siliziumkarbid-Werkstoffen, Ingenieur Digest, 5, 1982.
- 11 G. Willmann, Keramische Werkstoffe für Solarerhitzer, cfi-Berichte der DKG, 58, 1981, 153.
- 12 3. BMFT-Status-Seminar: "Keramische Bauteile für Fahrzeug-Gasturbinen", Springer-Verlag, 1984, im Druck.
- 13 G. Heimke, Keramik in der Chirurgie, Keramische Zeitschrift 34, 10, 1982, 604.

## TABELLE 1

EIGENSCHAFTEN DER NICHTMETALLISCH-ANORGANISCHEN WERKSTOFFE ALS BASIS FÜR DIE ANWENDUNG

Festigkeit	bei Raumtemperatur bei hoher Temperatur	} Ermüdung
Härte, Verschleiß	Maschinenbau	
Chemische Beständigkeit	Chemische Industrie	} Lebensdauer
Biokompatibilität	Medizintechnik	
Wärmedehnung	niedrig: gute Thermoschockbeständigkeit hoch: Anpassung an Metall	
Wärmeleitfähigkeit	niedrig: Thermische Isolation hoch: Thermoschockbeständigkeit Wärmetauscher	
Niedrige Dichte	Bewegte Teile	
Spezielle elektrische und	magnetische Eigenschaften	
Maßgenauigkeit	Niedrige Toleranzen	
Bearbeitbarkeit	Hohe Oberflächengüten	
Formgebungsmöglichkeiten	Komplexe Formen	

TABELLE II

Einteilung moderner Keramik nach Funktionen

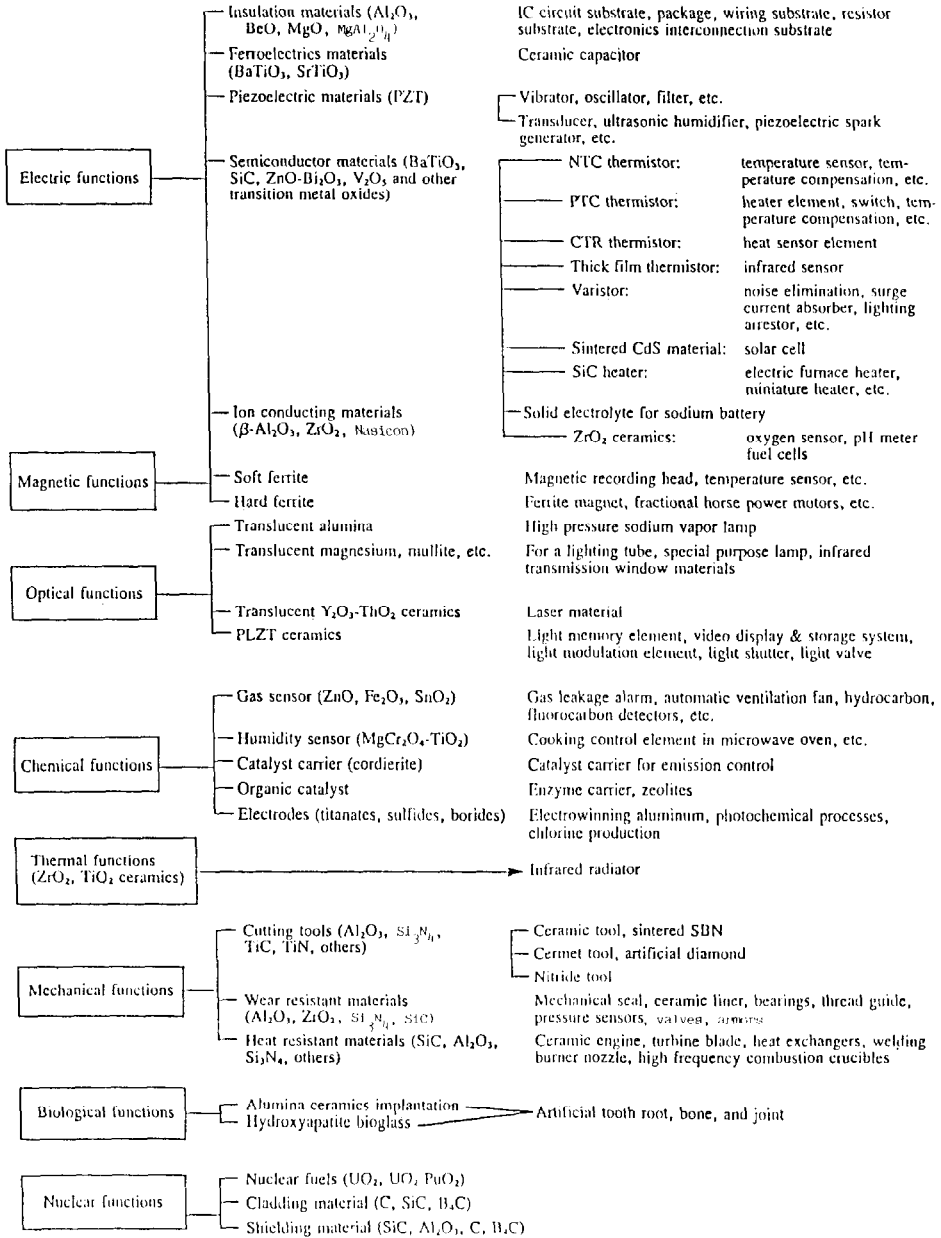


TABELLE III

Vorteile durch Anwendung von Keramik im Motorenbau

VORTEILE	ANWENDUNGSBEISPIELE
<p><u>1. HÖHERER WIRKUNGSGRAD</u></p> <p>DURCH</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- WÄRMEDÄMMUNG</li> <li>- GERINGERES GEWICHT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ZYLINDERLAUFBUCHSE</li> <li>- KOLBENISOLATION</li> <li>- ZYLINDERKOPFPLATTE</li> <li>- GASFÜHRENDE TEILE (ABGASKRÜMMER, PORTLINER)</li> <li>- TURBOLADERROTOR</li> <li>- KOLBENBOLZEN</li> </ul>
<p><u>2. HÖHERE LEBENSDAUER</u></p> <p>DURCH</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- HÖHERE VERSCHLEISSFESTIGKEIT</li> <li>- VERKÜRZUNG KALTSTART</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NOCKEN AUF NOCKENWELLE</li> <li>- VENTILSTÖSSEL</li> <li>- SCHWING- UND KIPPHEBEL</li> <li>- LAGER FÜR MOTORENBREMSKLAPPE</li> <li>- WIRBELKAMMER MIT SCHUSSKANAL</li> <li>- KOLBENMULDE</li> </ul>
<p><u>3. GEWICHTSEINSPARUNG</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ALLE KERAMISCHEN TEILE (S. O.)</li> <li>- WEGFALL KÜHLSYSTEM</li> <li>- KERAMIKANGEPASSTE KONSTRUKTION WEGFALL SCHMIERSYSTEM HÖHERE LEISTUNG</li> </ul>
<p><u>4. KOSTENERNIEDRIGUNG</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DURCH 1 BIS 3</li> <li>- ERSETZEN SUPERLEGIERUNG</li> </ul>

TABELLE IV

Klassifikation von Biomaterial

KLASSE	GEWEBEREAKTION	TYPISCHE WERKSTOFFE
BIOTOLERANT	DISTANZ-OSTEOGENESE	KORROSIONSBESTÄNDIGE METALLE WIE ROSTFREIER STAHL, CO-BASISLEGIERUNGEN
BIOINERT	KONTAKT-OSTEOGENESE	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -KERAMIK TITAN
BIOAKTIV	BINDUNGS-OSTEOGENESE	HYDROXYLAPATIT TRICALCIUMPHOSPHAT CA-PHOSPHAT ENTHALTENDE GLÄSER UND GLASKERAMIKEN

TABELLE VI

Einsatz thermoanalytischer Methoden für moderne nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe

WERKSTOFF	ZWECK	METHODE
OXID-PULVER	HYDROXIDPHASEN	DTA, TGA
SPRITZGIESSMASSEN	AUSBRENNVERHALTEN	DIL
OXID-KERAMIK NO-KERAMIK	SINTERVERHALTEN	HT-DIL
MISCHOXIDE	REAKTIONEN	DTA
Si → Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	NITRIDIERVERHALTEN	TGA
ZrO <sub>2</sub> (PSZ, TZP)	UMWANDLUNGSVERHALTEN	DIL
NO-KERAMIK	OXIDATIONSVERHALTEN	TGA
INGENIEUR-KERAMIK	WÄRMEDEHNUNG ALS GRUNDLAGE FÜR - KONSTRUKTION - TWB	DIL

TABELLE V

Die wesentlichen Eigenschaften keramischer Werkstoffe für den Einsatz im Maschinenbau

Bezeichnung	Basis	Type	Raumgewicht g/cm <sup>3</sup>	Porosität %	Biegefestigkeit (Kurzzeit)			E-Modul 20 °C	Wärme- dehnung 20-1000 °C 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	Wärmeleit- fähigkeit 20 °C W/mK
					20 °C MN/m <sup>2</sup>	1000 °C MN/m <sup>2</sup>	1400 °C MN/m <sup>2</sup>			
RBSN		Reaktions- gebunden	2,0 - 2,7	15 - 40	150 - 250	150 - 300	120 - 150	3,0	10 - 20	
SSN, SRESN (Sialone)	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Gesintert	3,3	<2	500	450	310	3,3	35	
HPSN/HIP SN		Heißge- gepresst	3,2	0	700	650	320	3,2	40	
SiSiC		Reaktions- gesintert	3,1	0	350	400	360	4,3	140	
Rekristalli- siertes SiC		Rekristalli- siert	2,6	20	100	100	200	4,5	80	
SSiC	SiC	Gesintert	3,15	<2	400	450	400	4,4	120	
HPSiC/ HIP SiC		Heißgepresst	3,2	0	550	550	420	4,5	120	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Gesintert	4,0	0	350	300	380	8,0	30	
PSZ		Gesintert + getempert	5,8	0	700	200	200	10,0	2	
TZP	ZrO <sub>2</sub>	Gesintert	6,0	0	>1000	200	200	10,0	2	
AlTi	Al <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	Gesintert, reaktions- gesintert	3,2	10	30	50	15	2,0	3	