Keramische Werkstoffe im Motorenbau?

Autor(en): **Hintsches, Eugen**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 33/34

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74846

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Keramische Werkstoffe im Motorenbau?

Der Verwendung von keramischen Werkstoffen anstelle von Metallen bei der Serienfertigung von Kraftfahrzeug-Motoren stehen bisher noch «herstellungs- und werkstoffbedingte Probleme von beachtlichem Umfang» im Weg. Darauf machte Prof. Günter Petzow, Leiter des Pulvermetallurgischen Laboratoriums des Max-Planck-Instituts für Metallforschung, Stuttgart, aufmerksam. Vor allem bereite die Massenfertigung Schwierigkeiten, weil die Herstellungsverfahren keine gleichbleibenden Eigenschaften der im Vergleich zu Metallen wesentlich hitzebeständigeren Keramikmaterialien gewährleisten. Nach Meinung Petzows ist jedoch schon in den kommenden Jahren damit zu rechnen, dass zunächst einfache keramische Bauteile helfen werden, herkömmliche Verbrennungsmotoren effektiver, leichter, leiser und durch bessere Treibstoffverbrennung umweltfreundlicher zu machen. Das vollständig aus Keramikwerkstoffen bestehende Antriebsaggregat hingegen bleibe ein langfristiges Vorhaben, dessen Verwirklichung zwar keineswegs utopisch, aber noch mit beachtlichen Schwierigkeiten verbunden sei. Die in jüngster Zeit vorgeführten Keramik-Versuchsmotoren seien lediglich einzelne Demonstrationsobjekte, die vor allem das riesige, bisher noch kaum erschlossene Materialpotential der keramischen Werkstoffe zeigen.

Die vielfach bereits angekündigte «Revolution im Motorenbau durch den Wunderwerkstoff Keramik» findet - vorerst jedenfalls - noch nicht statt. «Herstellungs- und werkstoffbedingte Probleme von beachtlichem Umfang» stehen bisher der Verwendung von keramischen Werkstoffen anstelle von Metallen bei der Serienfertigung von Motoren für Motorfahrzeuge im Weg. Diese Ansicht vertrat Prof. *Günter Petzow,* Leiter des Pulvermetallurgischen Laboratoriums des *Max-Planck-Instituts für Metallforschung, Stuttgart,* kürzlich in einem Vortrag mit dem Titel «Keramische Werkstoffe im Motorenbau - ein Utopie?» Prof. Petzow: «Keramiken im Motorenbau sind grundsätzlich keine Utopie mehr im Sinne einer unrealistischen Schwärmerei. Doch die in letzter Zeit vorgeführten Antriebsaggregate aus keramischen Werkstoffen - und es werden in nächster Zeit noch weitere dazukommen - sind lediglich einzelne *Demonstrationsobjekte.* Sie zeigen zwar eindringlich die Einsatztauglichkeit keramischer Werkstoffe für diese Anwendungen und bestätigen, dass der Keramikmotor im Prinzip funktioniert. Von einer Serienfertigung solcher teilweise oder gar vollständig aus keramischen Werkstoffen bestehenden Motoren sind wir aber noch sehr weit entfernt.»

Gleichwohl arbeiten auf der Welt nahezu alle Hersteller von Motorfahrzeugen, Motoren und Turbinen, aber auch viele Firmen der keramischen Industrie - oft durch erhebliche staatliche Förderung unterstützt - fieberhaft an der Entwicklung von Keramikwerkstoffen für Antriebsaggregate. Denn der älteste Werkstoff der Menschen - die Keramik (griechisch: ceramos = gebrannte Erde) - hat gute Voraussetzungen, zum modernsten Werkstoff im Motorenbau zu werden. Mit den klassischen, seit mehr als 10 000 Jahren verwendeten Materialien der Töpferkunst haben solche modernen Keramiken freilich nicht mehr viel gemeinsam. Prof. *Petzow:* «Vielmehr handelt es sich um eine ganz neue Klasse massgeschneiderter Werkstoffe, denen man auch noch Temperaturen von mehr als 1200 Grad Celsius zumuten kann - eine Hitze also, bei der herkömmliche Metalle ohne Kühlung längst in die Knie gegangen sind.»

Kühlsystem fällt weg

Auf diesen Vorstoss in einen neuen, der Technik bisher nur schwer zugänglichen Temperaturbereich stützen sich grosse Erwartungen. Weil Keramiken ausserdem noch eine *bessere Wärmedämmung* haben, lässt sich damit bei Verbrennungsmotoren der Wirkungsgrad deutlich steigern, denn mit zunehmender Arbeitstemperatur nutzen Wärmekraftmaschinen die Energie besser. Der Treibstoff wird also effektiver verbrannt, es entstehen *weniger Abgase,* die Umwelt wird weniger belastet. Zudem kann - wegen der besseren Isolierung des Verbrennungsraumes durch Keramiken - das Kühlsystem einschliesslich Ventilator, Schläuchen und Keilriemen wegfallen.

Weil dadurch wiederum heissere Abgase entstehen, lassen sich beispielsweise *Turbolader* weitaus besser nutzen, sie können also noch mehr vorgewärmte Luft in die Brennkammern pressen und so die Motorleistung weiter steigern bzw. den spezifischen Treibstoffverbrauch verringern. Diese Vorteile will man künftig zum Beispiel beim geplanten *«adiabatischen»* (= ohne Wärmeaustausch arbeitenden) *Dieselmotor* verwerten. Dazu kommt noch die wegen der besseren Verschleissfestigkeit *grössere Lebensdauer* und das im Vergleich zu den meisten Metallen *geringere Gewicht* der Keramikteile.

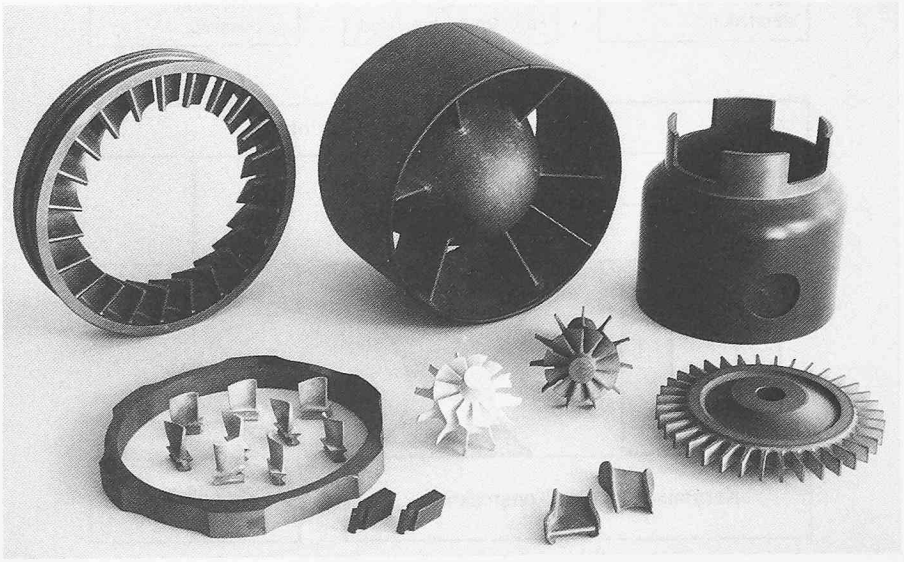
Vorteile durch Verwendung von Keramik	*Anwendungsbeispiele*
Höherer Wirkungsgrad durch	
a) Wärmedämmung	Zylinderlaufbuchse Kolbenisolation Zylinderkopfplatte Auspuffkrümmer
b) Abgasturbolader	Turboladerrotor
Höhere Lebensdauer durch höhere Verschleissfestigkeit	Ventilstössel Schwing- und Kipphebel Lager für Motoren-Bremsklappe
Gewichtseinsparung	Pleuelstange mit keramischen Kolbenbolzen Nockenwelle mit keramischen Nocken

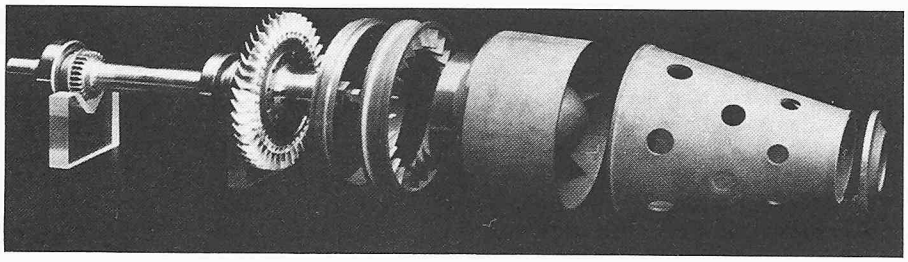
Vorteile und Anwendungsbeispiele keramischer Werkstoffe im Motorenbau

Ziel: Heissgasturbine

Ziel dieser Anstrengungen ist auch die Entwicklung von hochtemperaturbeständigen Keramiken für Heissgasturbinen. Solche Maschinen funktionieren im Prinzip wie Düsentriebwerke von Flugzeugen. Wenn sie jedoch beim Antrieb von Motorfahrzeugen den herkömmlichen, unter 500 Grad operierenden Otto- oder Dieselmotoren überlegen sein sollen, müssen sie mit mindestens 1350 Grad Celsius Betriebstemperatur laufen. Dafür liefern solche Aggregate - statt dem stampfenden Auf und Ab von Kolbenmotoren - gleich eine Drehbewegung. Gasturbinen brauchen deshalb nur noch ungefähr die Hälfte an beweglichen Teilen wie herkömmliche Motoren, sie sind also wesentlich einfacher gebaut und somit wegen Störungen weitaus weniger anfällig.

Einige Versuchs-Bauteile aus keramischen Werkstoffen für Antriebsmotoren: Nach Angaben von Prof. Ernst Gugel, Leiter des Geschäftsbereichs Ceranox der Annawerk GmbH, Rödental, des ersten industriellen Unternehmens in der Bundesrepublik für die Herstellung nichtoxid-keramischer Materialien, verspricht die bei der Verwendung von Keramik mögliche höhere Arbeitstemperatur in Verbrennungsmotoren eine Verbesserung des Wirkungsgrads von über 20 Prozent gegenüber dem derzeitigen Stand. Dadurch liessen sich allein in der Bundesrepublik Deutschland jährlich schätzungsweise vier Milliarden Liter Treibstoff einsparen





Nahezu alle Hersteller von Motorfahrzeugen und Motoren, aber auch viele Firmen der keramischen Industrie arbeiten an der Entwicklung von Keramik-Werkstoffen für Antriebsaggregate, so auch die Motoren- und Turbinen-Union München GmbH (MTU): Sie hat die im Bild gezeigten Komponenten aus Keramik-Material für eine Gasturbine entwickelt

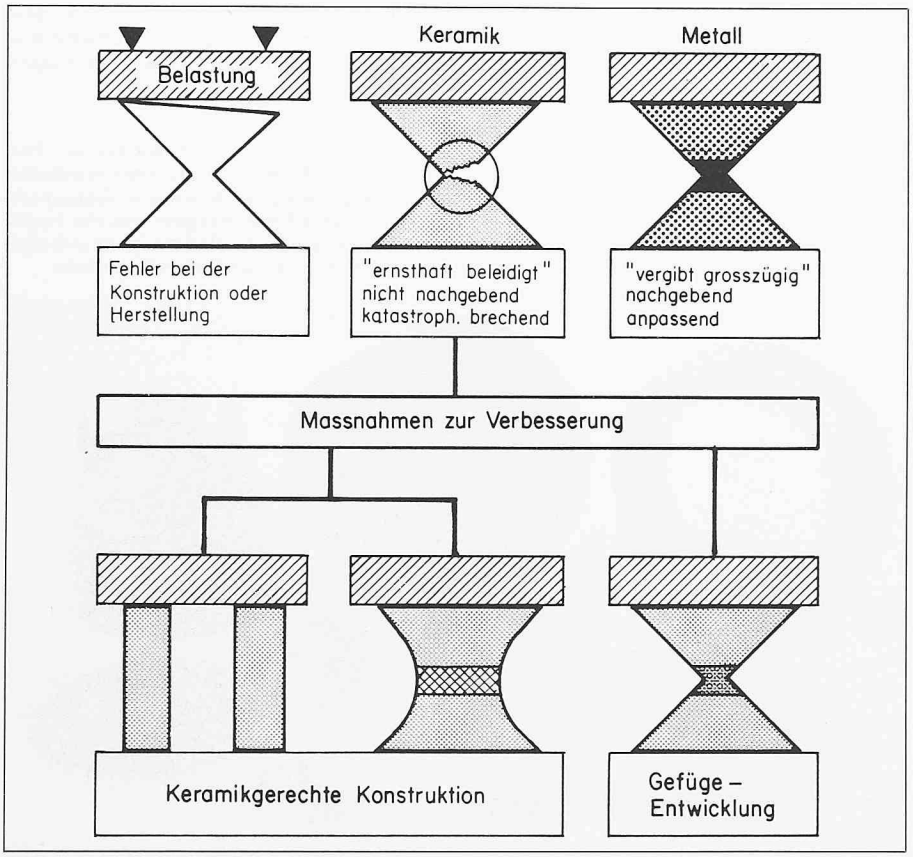
In der *Bundesrepublik Deutschland* unterstützt das *Bundesministerium für Forschung und Technologie* seit 1974 die Entwicklung von Gasturbinen für Kraftfahrzeuge. Prof. *Petzow:* «Diese Förderung hat sich über das eigentliche Ziel hinaus auf die Entwicklung von keramischen Werkstoffen im allgemeinen sehr segensreich ausgewirkt. Auch die Arbeit an keramischen Bauteilen für Otto- und Dieselmotoren hat davon viel profitiert.»

Teile aus verschiedensten Keramiken

Freilich: «Stand der Technik», also im alltäglichen Gebrauch etwa bei der Serienfertigung von Motoren, sind selbst Einzelteile aus Keramik bisher noch nicht. Im Gegenteil: Die auf Versuchsständen überall in der Welt laufenden Maschinen arbeiten mit den unterschiedlichsten Teilen wie zum Beispiel *Zylinderlaufbuchsen, Schwing- und Kipphebeln, Nocken- und Kurbelwellen* oder *Pleuelstangen* aus den verschiedensten keramischen Werkstoffen. Prof. *Petzow:* «Die Situation ist sehr unübersichtlich, insbesondere bei den Werkstoffen.» Der Grund: «Bei der Erschliessung der aussergewöhnlichen Möglichkeiten, die keramische Werkstoffe bieten, stehen wir erst am Anfang; hier muss die Grundlagenforschung noch eine Menge Arbeit leisten.»

Solche Keramiken sind vor allem Oxide, Karbide, Nitride, Boride und Silizide, also *chemische Verbindungen der Elemente Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Bor und Silizium mit Metallen* - aber auch *Mischungen* dieser Substanzen untereinander, eine umfangreiche Palette von Werkstoffen: Erst einige wenige davon werden bereits genutzt; etwa als *hochverschleissfeste Teile im Maschinenbau,* gut verträgliche *Implantationswerkstoffe in der Medizin* zum Beispiel für *künstliche Zähne* oder *Hüftgelenke,* als *«Ziehsteine» bei der Metallumformung* oder als *Schneidwerkzeuge bei der spanenden Metallbearbeitung:* Von der Vielfalt aller möglichen keramischen Werkstoffe sind bisher noch nicht einmal ein oder zwei Prozent genau erforscht. «Dieses riesige Materialpotential ist kaum angetastet, es überwiegen eindeutig die ungenützten Möglichkeiten für interessante Kombinationen verschiedener Eigenschaften», stellt. Prof. *Petzow* dazu fest.

Benachteiligt gegenüber Metallen sind keramische Werkstoffe wegen ihrer grösseren Sprödigkeit: Bei ungleichmässigen Belastungen beispielsweise brechen Keramiken meistens nach nur geringfügigen Verformungen abrupt, während Metalle durch elastisches beziehungsweise plastisches Nachgeben zum Beispiel Fehler bei der Konstruktion «verzeihen». Durch gezielte Veränderungen des Materialgefüges, etwa durch Einlagerung von Zirkonoxid-Teilchen in den keramischen Grundwerkstoff, versuchen Wissenschaftler diesen natürlichen Nachteil der Keramiken so weit auszugleichen, dass die anderen hervorragenden Eigenschaften dieses Materials, wie grosse Hitzebeständigkeit, genutzt werden können. Ein anderer, bisher kaum beschrittener Weg, diese Schwäche wettzumachen, ist die keramikgerechte Konstruktion, bei der Bauteile entsprechend den Materialeigenschaften des spröden Werkstoffs neu gestaltet werden



Vorbild Zündkerze

Das erste keramische Teil im Automobilmotor hat sich - kaum beachtet - mittlerweile seit mehr als 60 Jahren bewährt, es «funktioniert vortrefflich»: die Zündkerze. Sie erfüllt im Temperaturbereich zwischen 600 und 700 Grad Celsius alle Anforderungen, die - bei höheren Temperaturen - auch an künftige Keramikwerkstoffe für den modernen Motorenbau gestellt werden. Die Zündkerzenkeramik ist beständig gegen raschen Temperaturwechsel, Verschleiss, Kriech- oder Ermüdungserscheinungen; sie hat eine grosse Festigkeit, ist gasdicht und auch Korrosion verursachende Verbrennungsrückstände können ihr nichts anhaben. «Man hat heute fast verdrängt, dass viele werkstoffliche Probleme, die im Zusammenhang mit der Motorenkeramik auftauchen, bereits in ähnlicher Form bei der Entwicklung der Zündkerze vorlagen und für diesen speziellen Fall gelöst worden sind», kommentiert Prof. *Petzow.*

Für künftige Keramikmotoren reichen freilich die Eigenschaften der überwiegend aus Aluminiumoxid bestehenden Zündkerzen-Werkstoffe nicht mehr aus: Solche Teile müssen nämlich nicht nur noch stärkeren mechanischen und thermischen Belastungen standhalten, sie sind überwiegend auch noch wesentlich grösser in Abmessungen als Zündkerzen.

Eine «böse Eigenschaft der Keramiken» aber machte den Werkstoff-Forschern bisher besonders zu schaffen: die *Sprödigkeit* und, dadurch bedingt, die *grosse Empfindlichkeit des Materials gegen Schläge und sprunghafte Temperaturwechsel.* Anders als Metalle, die zum Beispiel ungleichmässige Belastungen durch elastisches bzw. plastisches Nachgeben ausgleichen können, brechen Keramiken meistens bereits nach nur geringfügigen Verformungen so abrupt, dass Fachleute von «katastrophalen Brüchen» sprechen. «Dieses angeborene Erzübel müssen wir so weit zurückdrängen, dass der Einsatz von keramischen Werkstoffen im Motorenbau überhaupt möglich wird und somit auch die anderen hervorragenden Eigenschaften des Materials zum tragen kommen können», meint Prof. *Petzow.* «Doch haben wir auf diesem Gebiet in letzter Zeit Fortschritte gemacht, die uns vor wenigen Jahren noch niemand geglaubt hätte.»

Falle für grosse Risse

Ein ungewöhnliches Konzept, die Sprödigkeit von Keramiken zu verringern und die Bruchfestigkeit des Materials stark zu steigern, haben die Wissenschaftler des Pulvermetallurgischen Laboratoriums am Max-Planck-Institut für Metallforschung selbst entwickelt: die *Einlagerung von Zirkonoxid in den keramischen Grundwerkstoff*. Dieses Pulvergemisch wird bei hohen Temperaturen durch Sintern verdichtet. Während beim Abkühlen von der Herstellungstemperatur der Grundwerkstoff schrumpft, ändert das Zirkonoxid sprunghaft seine Kristallstruktur von der tetragonalen zur monoklinen Modifikation. Diese Umwandlung ist mit einer Volumenzunahme von ungefähr vier Prozent verbunden. Im Werkstoff entstehen um die Zirkon-Teilchen lokale Spannungen, die schliesslich viele haarfeine Risse verursachen können, die jedoch nicht miteinander zusammenhängen. «So widersinnig dies zunächst erscheinen mag: Aber solche Mikrorisse wirken als Fallen für das Material durchquerende grosse Risse, denn in diesen Prozesszonen verliert der Bruch dadurch an Energie, dass er aufgespalten wird, seine Richtung ändert und schliesslich - weil er keine Kraft mehr zum Weiterlaufen hat - steckenbleibt», beschreibt Dr. *Nils Claussen* dieses Prinzip, grosse Risse durch viele kleine, künstlich angelegte Risse in keramischen Werkstoffen zu stoppen.

Mit diesem *«Rissauffang-System»* gelang den Pulvermetallurgen des Max-Planck-Instituts zum Beispiel bei den derzeit für den Motorenbau aussichtsreichen Keramik-Grundwerkstoffen *Aluminiumoxid, Siliziumnitrid* oder *Siliziumkarbid* durch derartige Einlagerungen den Bruchwiderstand um bis zu 260 Prozent und die Festigkeit um bis zu 165 Prozent zu steigern - ein Ergebnis, das auch zu einer deutlichen Verbesserung beispielsweise der Beständigkeit von Keramiken gegen schnelle Temperaturwechsel führt. «Diese Methode ist noch keineswegs ausgereizt, ähnlich wie weitere, auf Mechanismen vollständig anderer Art beruhende Verfahren zur Verbesserung der Eigenschaften von Keramikwerkstoffen. Hier stecken noch eine Menge Möglichkeiten, die wir bisher nicht in vollem Umfang überschauen», fasst *Petzow* zusammen. «Auch bei den Metallen hat es einst Jahrzehnte, wenn nicht sogar Jahrhunderte gedauert, ehe man gelernt hat, durch werkstoffkundliche Kunst aus den Grundsubstanzen oder Mischungen enorme Verbesserungen der Eigenschaften zu erreichen.»

Keramische Legierungen

Inzwischen gibt es bei Keramiken «in Abhängigkeit von Herstellungsverfahren und Zusätzen eine erstaunlich grosse Variantenbreite, die durchaus den Legierungen eines metallischen Elements gleichzusetzen ist». Durch die zusätzliche Anwendung verschiedener Konzepte zur Verstärkung des Materials kann so eine Vielzahl von keramischen Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt werden - massgeschneidert für den jeweiligen Anwendungszweck. Prof. *Petzow:* «Dies ist die eigentliche Herausforderung der Keramik an den Werkstoff-Forscher.»

Werkstoffe	Eignung Eigenschaftsverbesserung Varianten Verfügbarkeit	Gut Möglich Zahlreich Optimal
Herstellung	Einzelfertigung Serienfertigung Metall/Keramik-Verbund Keramikbeschichtung Keramikgerechtes Konstruieren	Stand der Technik Problematisch, nur in Ansätzen erprobt Im Labormassstab demonstriert Im Labormassstab demonstriert Nicht durchgeführt
Wirtschaftlichkeit	Ausnutzung gegebener Maschinenparks	Noch ungewiss Kaum möglich
Servicefreundlichkeit		Sehr problematisch

Perspektiven für die Verwendung von Keramiken in Motorenbauteilen

Allerdings erfordert die Produktion ungewöhnliche Genauigkeit: Schon geringe Abweichungen von nur wenigen Zehntel Prozent bei der chemischen Zusammensetzung von keramischen Werkstoffen haben oft beträchtliche Veränderung der Materialeigenschaften zur Folge. Prof. *Petzow:* «Deshalb ist es nicht allzu schwierig, einzelne keramische Teile herzustellen. Aber es ist sehr schwer, grössere Stückzahlen mit gleichbleibenden Eigenschaften zu produzieren, weil bei solchen Keramikteilen die chemische Zusammensetzung, die Kristallstruktur und das optimale Gefüge ohne innere Fehler wie Poren oder Risse strikt eingehalten werden müssen.» Aus diesem Grund sei die Serienfertigung auch von einfachen Keramikteilen für den Motorenbau erst in Ansätzen vorhanden. *Schwachstellen* bestehen ausserdem noch bei der *Verbindungstechnik,* also dem Aneinanderfügen von Metallen und Keramiken, aber auch zwischen Keramik und Keramikteilen. Bei höheren Temperaturen versagen die bisher üblichen Löt- und Klebeverfahren.

Dennoch erwartet *Petzow* schon in nächster Zeit bei der Weiterentwicklung zunächst bei den Werkstoffen und später auch bei den Verarbeitungstechniken erhebliche Fortschritte, die zu einer verbesserten Konkurrenzfähigkeit der Keramiken im Motorenbau führen. So erscheint zum Beispiel das *Diffusionsschweissen,* bei dem eine Verbindung zwischen Metall und Keramik durch Festkörperreaktionen zustandekommt, als aussichtsreiche Fügetechnik. Sie ist bisher allerdings kaum über den Labormassstab hinaus demonstriert. Dies gilt auch für das *Beschichten* metallischer Bauteile durch keramische Oberflächenschichten - etwa durch *Plasmaspritzen im Unterdruck,* wobei die heissen Pulverteilchen des Keramikmaterials mit Überschallgeschwindigkeit auf die Metallunterlage treffen: Dies ist eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Betriebstemperatur und zum Verringern des Verschleisses von Motorteilen.

Grundsätzlich sind nach Meinung von *Petzow* für verschiedene Bauteile schon jetzt genügend Varianten an erprobten keramischen Werkstoffen vorhanden, deren Eigenschaften noch weiter verbessert werden können. Ein ungelöstes Problem stellt hingegen noch die *«reproduzierbare Serienfertigung»* dar, also die Übertragung der Werkstoffeigenschaften in das keramische Bauteil bei der Serienfertigung durch geeignete Herstellungsverfahren.

Unter diesen Umständen rechnet der Wissenschaftler damit, dass viele Motorfahrzeug- und Motorenhersteller erst einmal damit beginnen werden, nach und nach einzelne metallische Teile durch keramische Motorenteile zu ersetzen. Verschleissteile, etwa die von einer deutschen Automobilfirma entwickelten Schwing- und Kipp-Hebel oder Ventil-Stössel aus Keramik, haben offenbar die grösste Chance, zuerst in Serie hergestellt zu werden. Prof. *Petzow:* «Schon in den kommenden Jahren ist damit zu rechnen, dass einige einfache keramische Teile helfen werden, Motoren effektiver, leichter, leiser und durch bessere Treibstoffverbrennung umweltfreundlicher zu machen.» Motoren und Kraftfahrzeug-Gasturbinen, die vollständig aus keramischen Werkstoffen bestehen, dürften hingegen noch ein langfristiges Projekt sein, dessen Verwirklichung zwar keineswegs utopisch sei, der aber noch beachtliche Schwierigkeiten entgegenstünden.

Werkstoffeigene Konstruktion

Über die weitere Zukunft der Motorkeramik dürfte jedoch auch mitentscheiden, in welchem Ausmass es gelingt, Motoren keramikgerecht zu konstruieren. Dies sei eine Arbeitsrichtung, die bis jetzt kaum gelehrt, geschweige denn in der Praxis angewendet wird. Untersuchungen hätten jedoch gezeigt, dass es für eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrads von Verbrennungskraftmaschinen nicht allein genügt, metallische Bestandteile herkömmlicher Motoren durch keramische Komponenten zu ersetzen. Vielmehr müsse der Motor - den Eigenschaften der keramischen Werkstoffe entsprechend - konstruiert werden. «Aber nicht nur die Konstrukteure müssen sich vom Althergebrachten lösen und begreifen, für die Keramik zu konstruieren. Auch die Mitarbeiter der Herstellerfirmen, des Vertriebs und der Reparaturwerkstätten müssen umdenken und lernen, mit diesem im Vergleich zu zähen Metallen spröden Werkstoffen umzugehen», betont Prof. *Petzow.* «Deshalb wünschen wir uns, dass weiterhin möglichst viele Keramik-Versuchsmotoren gebaut und ausprobiert werden, damit das Misstrauen der Maschinenbauer gegen keramische Werkstoffe allmählich abgebaut wird.»

Eugen Hintsches, München