

3.1.2. Hochleistungskeramik

Von G. PETZOW und R. DANZER

Kurzfassung von G. STERK

Die Hochleistungskeramik basiert auf anorganischen Verbindungen (Oxide, Nitride, Carbide, Boride), die in vielfältiger Weise zu kombinieren sind. Ihre Verarbeitung zu mechanisch hochbeanspruchbaren Werkstücken gelang erst in unserer Zeit, als wichtige technische Voraussetzungen dafür geschaffen waren. Diese Werkstoffgruppe ist so jung, daß nicht einmal die Nomenklatur einheitlich ist. Bezeichnungen wie Ingenieur- oder Sonderkeramiken, high-tech ceramics, advanced oder fine ceramics sind ebenfalls gebräuchlich.

Heute weisen die Hochleistungskeramiken bereits beachtliche Anwendungserfolge auf. Ihnen ist ein vielversprechendes Potential für weitere technische Nutzungen zuzuschreiben.

Das jährliche Wachstum des Marktvolumens wird mit 15 bis 20% angenommen. Das Weltmarktvolumen betrug im Jahre 1988 etwa 160 Mrd. öS. Es wird angenommen, daß es bis zum Jahr 2.000 auf etwa 300 bis 700 Mrd. öS ansteigen wird. Der Weltmarkt wird derzeit von wenigen Ländern beherrscht: Japan rund 70%, USA rund 17%, BRD rund 5%.

Österreich hat bei der Hochleistungskeramik einen Weltmarktanteil von etwa 1%, wobei insbesondere spezialisierte Produkte der Elektrokeramik (Varistopren, Thermistoren, Kondensatoren) und der Mechanokeramik (Beläge für Papiermaschinen, Katalysatorträger) in den Marktsegmenten der einschlägig tätigen Unternehmen starke Anteile aufweisen. Davon abgesehen sind österreichische Unternehmen nur in einigen Randbereichen der Hochleistungskeramik, wie Feuerfeststoffe, Schleifmittel, Beschichtungen usw., tätig.

Eine Reihe wichtiger Eigenschaften macht die Hochleistungskeramik gegenüber anderen Werkstoffen besonders attraktiv, wie die hervorragenden Hochtemperatureigenschaften, die gute Verschleißfestigkeit, die extreme Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit, aber auch die hohe elektrische Isolation, die gute Schneidfestigkeit usw. Noch nicht zufriedenstellend gelöst sind die Sprödigkeit und das ungünstige Verhalten bei schlagartiger mechanischer Beanspruchung. Der Verbesserung des Bruchwiderstandes kommt daher eine zentrale Bedeutung bei der Forschung und Entwicklung zu. Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten, die Sprödigkeit zu verringern: Minderung der kritischen Fehlergröße, die vor allem durch eine höhere Verarbeitungsqualität erreicht werden kann, und Erhöhung des

kritischen Bruchwiderstandes durch Gefügeoptimierung ohne oder mit zusätzlichen Verstärkungsmechanismen. Die Verstärkung kann insbesondere durch Einlagerung von Teilchen und Whiskern (einkristalline Fäserchen) bewirkt werden.

Es ist zu erwarten, daß bei weiteren Verbesserungen, insbesondere bei Verringerung der Sprödigkeit, die Anwendung der Hochleistungskeramiken noch stärker zunehmen wird. Besondere Marktzuwächse sind zu erwarten, wenn es gelingt, in einzelnen, heute noch nicht völlig beherrschten Bereichen den Durchbruch zur Marktreife zu erzielen, wie z.B. bei der Motorkeramik, bei Hochtemperatursupraleitern usw.

Seit einiger Zeit wird intensiv an der Entwicklung keramischer Ventile für Hubkolbenmotoren gearbeitet. Bereits durchgeführte Versuche bei Fahrzeugen von Daimler-Benz mit keramischen Ventilen verliefen derart gut, daß an der Serienreife derselben zügig weitergearbeitet wird. Hervorgehoben werden der durch keramische Ventile bewirkte deutlich ruhigere Lauf, eine wesentliche Minderung der Emissionen (Kohlenwasserstoffe um rd. 30%, Kohlenmonoxid um rd. 20% und Stickoxide sogar um rd. 80%) sowie eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches um 3 bis 4%.

Die Hochleistungskeramik kann man einerseits nach den Eigenschaften (z.B. mechanische, thermische, elektrische, optische usw.) und andererseits nach den chemischen Kriterien (z.B. Oxide, Nitride, Boride usw.) einteilen.

Die Gliederung der Hochleistungskeramik nach den Produkteigenschaften (Werkstoffgruppen) ist meist für bestimmte Einsatzgebiete typisch (Bild 1). Diese Einteilung ist daher vor allem im Hinblick auf Produktmärkte von Interesse.

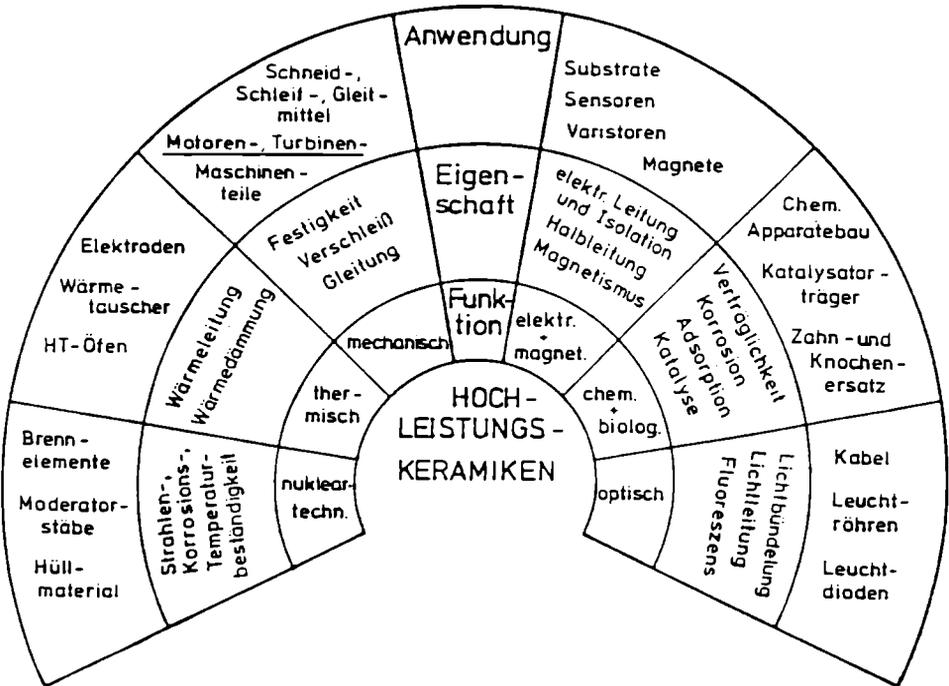


Bild 1: Beispiele für Eigenschaften und Anwendungen von Hochleistungskeramik

Für die Darstellung des Rohstoffbedarfes ist die Einteilung nach chemischen Kriterien interessanter (Tabelle 3).

Tabelle 3: Einteilung der Hochleistungskeramiken nach chemischen Kriterien

Werkstoff	Eigenschaften	Anwendungsbeispiele
<i>1.: Monolithische Werkstoffe</i> Siliciumcarbid (gesintert) SiC, Siliciuminfiliertes Siliciumcarbid SiSiC	Hohe Härte, Dichte, Wärmeleitfähigkeit, geringe Wärmedehnung, Thermoschockbeständigkeit, Verschleißfestigkeit, chem. Resistenz, hoher E-Modul	Wärmetauscher, Verschleißteile, Lager, Maschinen- u. Motorenbau, Brennerrohre, Medizintechnik, Transistoren, Chemieanlagenbau, Beschichtungen
Siliciumnitrid (gesintert) Si ₃ N ₄ , SiAlONe, Si _{6-x} Al _x O _x N _{8-x}	Wie SiC, jedoch etwas geringere Wärmeausdehnung, geringere Wärmeleitfähigkeit, höhere Raumtemperatur- und geringere Hochtemperaturfestigkeit, höhere Schlagzähigkeit	Dichtringe, Schneidkeramik, Verschleißteile, Maschinen- und Motorenbau, Medizintechnik, Brennerdüsen, Wärmetechnik, Beschichtungen
Carbide, Boride, Nitride, Silicide der Metalle Ti, Zr, Hf, V, Ta, Nb, Cr, Mo, W, Fe	Hohe Härte und Korrosionsbeständigkeit	Schneidkeramik, Schmelzmetallurgie, Heizleiter, Düsen, Schleifmittel, Beschichtungen
Aluminiumnitrid	Hohe Wärme- und niedrige elektrische Leitfähigkeit, geringere Wärmeausdehnung, chemische Resistenz	Mikroelektronik (Träger für Siliciumchips)
Aluminiumoxid Al ₂ O ₃	Gute Festigkeit, geringes spez. Gewicht, gute Gleiteigenschaften, korrosionsbeständig, elektr. isolierend, durchscheinend, biokompatibel	Gleit- und Dichtringe, Fadenführer, Tiegel, Stäbe, Rohre, Träger für Chips, Leuchtröhren, Implantate
Zirkoniumdioxid ZrO ₂ (teilstabilisiert, PSZ; tetragonal, TZP; cubisch, CSZ), Aluminium-Zirkoniumdioxid Al ₂ O ₃ ZrO ₂ , ZTA	Zähigkeit, Festigkeit, geringe Wärmeleitfähigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit, elektrische Leitfähigkeit von Sauerstoffkonzentration abhängig, Umwandlungsverstärkung (durch wechselnde Kristallstruktur)	Schmelzmetallurgie, Lambda-Sonde (Gas-Sensor), Beschichtungen, Schneidkeramik
Bleizirkoniumtitanat, PbZrTiO ₃ , PZT	Piezoelektrische Eigenschaften	Energieumwandlung, Ultraschalltechnik, Sensoren, Zündelemente, Tongeber, Aktuatoren
Bleilanthanzirkoniumtitanat (Pb, La) (Zr, Ti)O ₃ , PLZT	Elektrooptische Eigenschaften	Optosensoren
Zinnoxid, SnO ₂ , Zinkoxid, ZnO	Chemisch reaktive Oberfläche nicht linearer Widerstand	Sensoren, Varistoren
Aluminiumoxid-Titan- carbid, Al ₂ O ₃ -TiC	Härte, Verschleißfestigkeit	Beschichtungen, Schneidkeramik

Werkstoff	Eigenschaften	Anwendungsbeispiele
Siliciumkeramik (u.a. SiO ₂ -FeO-TiO ₂)	Niedrige Dichte, gute thermische Isolation	Isoliermaterial für Wärme- und Heizgeräte, Metallurgie
2.: Kohlenstoff-Werkstoffe	Härte, Festigkeit, Temperaturbeständigkeit, Korrosionsfestigkeit, Dichte (porenfrei), niedriges spezif. Gewicht, Körperverträglichkeit	Chemische Analytik, Implantate, Elektroden, Schmelztiegel, Maschinenbau
Glaskohlenstoff: polykrist. Diamant	Härte, Verschleißwiderstand	Schneid- und Schleifwerkzeuge
3.: Glas-Werkstoffe Ormosile (organisch modifizierte Silicate), hochreines Quarzglas	Kratzfestigkeit, Gasundurchlässigkeit, niedrige Lichtverluste, chemisch rein, auch bei hohen Temp., Reinheit von Inhomogenitäten	Beschichtungen von Glas, Acrylglas und Aluminiumfolie, Haftschildern, chem. und faseroptische Sensoren, Kommunikations- und Halbleitertechnik
Halogenid-Gläser (Fluoride, Chloride usw.) Glaskeramiken	Infrarotabsorption theoret. geringer als bei Quarzglas Geringe Wärmeausdehnung	Teilbereiche der optischen Glasfasermanwendung Optische Geräte, Implantate
Lithiumniobat (LiNbO ₃)	Elektrooptisch, piezoelektrisch	Oberflächenwellentechnik, elektrooptische Modulatoren
4.: Faserwerkstoffe		Verstärkungsfaser für Kunststoffe und Kohlenstoff
Kohlenstoff-Fasern	Hohe Zugfestigkeit, hoher Elastizitätsmodul, niedriges spezifisches Gewicht, leichte Oxidation bei höheren Temperaturen, auch SiC-beschichtet	Verstärkungsfaser für Aluminium und Titan Filter- und Isoliertechnik Isolierungen Verstärkungsfaser Sportgeräte, Luft- und Raumfahrzeugbau
Keramik-Fasern aus: - Siliciumkarbid mit oder ohne Substratfaden - Siliciumdioxid - Aluminiumoxid - Zirkoniumdioxid - Borfasern (mit Wolframseele)	Hohe Zugfestigkeit, chemisch beständig Hitzebeständig bis 1.100° C Wärmeisolation Wärmeisolation Hohe Zugfestigkeit, hohes spezifisches Gewicht	Verstärkung von Metallen und Keramiken
Siliciumcarbid-Whisker	Sehr hohe Zugfestigkeit, schwierige Verarbeitung	
5.: Faserverstärkte Verbundwerkstoffe		Luft- und Raumfahrt, Sportartikel, Fahrzeugbau, Röntgentechnik, Prothesen, Gleitringe und Lager
Kohlenstoffaserverstärkter Kohlenstoff, CFC	Hochtemperaturfest, formbeständig bis über 2.000° C, niedriges spez. Gew., chem. resist., hoher E-Modul, altert nicht, gute Leitfähigkeit, für Wärme und Elektrizität, oxidiert bei T > 550° C	Luft- und Raumfahrt

Werkstoff	Eigenschaften	Anwendungsbeispiele
Kohlenstoffaserverstärkte Glaskeramik	Gute Festigkeit und Zähigkeit auch bei hohen Temperaturen, hoher E-Modul, korrosionsbeständig	Motoren- und Maschinenbau
Andere faserverstärkte Keramik	Bessere Duktilität, verbessertes Spröbruchverhalten, erhöhte Bruchzähigkeit	Schneidtechnik
Whiskerverstärkte Keramik	Bessere Duktilität, verbessertes Spröbruchverhalten, erhöhte Bruchzähigkeit	
6.: Beschichtete Werkstoffe Keramikbeschichtetes Metall	Verschleißschutz, Hitzeschutz, Korrosionsschutz	Schneidtechnik, Verschleißteile, Motoren- und Triebwerksbau
Beschichtung von hochwarmfesten Sondermetallen (W, Ta, Mo, Nb) mit Al-Siliciden, Cermet-Überzügen	Verhinderung der Korrosion und Oxidation zumindest für kurzzeitigen Einsatz	Motoren- und Triebwerksbau

Die Materialien, aus denen die Hochleistungskeramik besteht, sind seit langem bekannt: Es sind Oxide, Nitride, Carbide und Boride, vorzugsweise des Aluminiums, des Siliciums und der Metalle der 4. und 6. Nebengruppe des periodischen Systems. Die Elemente, aus denen die Hochleistungskeramiken bestehen, sind also in der Erdkruste und Atmosphäre reichlich verfügbar. Hochleistungskeramiken werden wie viele konventionelle Keramiken und alle pulvermetallurgischen Werkstoffe aus „Pulvern“ hergestellt, die man zu einem sogenannten Grünkörper verpreßt und anschließend durch Sintern verdichtet. Beim Sintern verbacken die Pulverteilchen entweder direkt (Festphasensintern) oder mittels einer Schmelze, die wie ein Kleber wirkt (Flüssigphasensintern).

Die Herstellung von Hochleistungskeramiken erfordert Ausgangsprodukte mit sehr hohen Reinheitsgraden. Die „Pulver“, die ebenfalls pulverförmigen „Sintermittel (Additive)“ und die „Hilfsstoffe“ werden daher in der Regel chemisch (synthetisch) hergestellt. Grundsätzlich muß mit extrem feinem „Pulver“ mit Pulverdurchmessern von einigen Mikrometern und weniger gearbeitet werden. Bei der Verarbeitung kommt einer vollkommenen Durchmischung eine entscheidende Bedeutung zu.

Als Rohstoffe für die „Pulver“, wie Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , WC, BaTiO_3 , SiC, Si_3N_4 , ZrO_2 , BN usw., werden Bauxit, Quarzit bzw. Quarzsand, Scheelit bzw. Wolframit, Rutil bzw. Ilmenit, Zirkon, borhaltige Rohstoffe usw. verwendet.

Lagerstätten derartiger Rohstoffe sind – mengenmäßig gesehen – weltweit ausreichend vorhanden und stehen z.T. auch in Österreich zur Verfügung.

Weitere Fortschritte bei der Hochleistungskeramik sind durch die Entwicklung verbesserter Pulver, Whisker und Fasern zu erwarten, doch werden diese verbesserten synthetischen Grundstoffe aus denselben Rohstoffen wie die bisherigen Produkte erzeugt.

Die Forschung und Entwicklung auf dem Sektor der Hochleistungskeramik ist in Österreich zur Zeit noch bescheiden. Neben den bestehenden Aktivitäten in Randbereichen, wie eingangs erwähnt, sind Forschungsaktivitäten vor allem auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Supraleiter zu erwähnen.

Bereiche mit aussichtsreichen Entwicklungsperspektiven können in Österreich vor allem dort gefunden werden, wo auf Erfahrungen aus anderen Wissensbereichen zurückgegriffen werden kann, wie z.B. in der Konstitutionsforschung, der Werkstoff- und Metallkunde, der Pulvermetallurgie, der Gießereitechnik, der Umformtechnik, der Bearbeitungstechnik, der Werkstoffprüfung, der technischen Mechanik und der Konstruktionslehre, um nur einige zu nennen. Dieses Wissen könnte besonders in folgenden Forschungsbereichen der Hochleistungskeramik von Nutzen sein:

- Entwicklung mehrkomponentiger keramischer Legierungen,
- keramische Beschichtungen,
- Bearbeitung von Keramiken,
- Prüfung keramischer Werkstoffe,
- Konstruieren mit keramischen Werkstoffen und
- Verbindungstechnik zwischen Metall und Keramik.

Erfolgversprechende Entwicklungsperspektiven für die österreichische Industrie sind vor allem dann zu erwarten, wenn spezielle industrielle Anwendungen den Einsatz von Hochleistungskeramiken erfordern und zunächst kleine Serien benötigt werden (hohes Maß an Spezialisierung). Bei kleinen Serien ist der Eintritt in den Markt vermutlich eher möglich als bei Großserien, da etablierte Firmen auf ein größeres Produktionsvolumen eingerichtet sind (Nutzung von Marktnischen).

Ein Eintritt in die Massenproduktion hochleistungskeramischer Teile ist realistisch, wenn es zu einer breiten Zusammenarbeit mit anderen Herstellern und Großanwendern kommt und das entsprechende Know-how weitgehend von diesen Partnern, z.B. in Form von Joint-ventures, zur Verfügung gestellt wird. Solche Projekte können selbstverständlich nur von der Industrie definiert werden. Beispiele für Bereiche, in denen Hochleistungskeramiken in großen Mengen eingesetzt werden bzw. in denen so ein Einsatz absehbar ist, sind die Elektrotechnik, die Elektronik und die Automobilindustrie.

Es ist zu erwarten, daß wesentliche Impulse für die Forschung und Entwicklung in Österreich auf dem Sektor der Hochleistungskeramik aus dem vor einiger Zeit neu gegründeten Ordinariat für „Struktur- und Funktionskeramik“ an der Montanuniversität Leoben ausgehen werden.

Literatur-Auswahl

- (1) HAMMINGER, R. und HEINRICH, J.: Keramische Ventile für Automotoren, Spektrum der Wissenschaft, 1/1993.
- (2) British Ceramic Research Ltd.: Analysis of the Market for Advanced Ceramic Products in EC Countries, British Ceramic Research Ltd, 1987.
- (3) CADOTTE, E., BREWER, J., and CRAIG, D. F.: Industry Survey on CAMDEC and the Barriers to Commercialization of Advanced Ceramics, Ceramic Bulletin 66, 1987.

- (4) DANZER, R.: Performance Prediction for Ceramics: Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials, Pergamon Press, Oxford, UK, 1991.
- (5) DROSCHA, H.: Technische Keramik in Produktion und Entwicklung, Metall 41, 1987.
- (6) FETTWIS, G. B.: Zusammenfassung der Vorträge des Symposiums „Neue Rohstoffe für neue Technologien“, Grundlagen der Rohstoffversorgung 9, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien 1988.
- (7) Interceram: Ceramics in Japanese Automobile Construction – An Overview, Nr. 5, 1989.
- (8) KENNEY, G. B., and BOWEN, H. K.: High Tech ceramics in Japan: Current and Future Markets, Ceramic Bulletin 62, 1983.
- (9) OHLER, F.: Entwicklungsszenario Hochtemperatursupraleiter, Ludwig-Boltzmann-Institut für Wissenschaftsforschung, Graz 1988.
- (10) PETZOW, G., und ALDINGER, F.: Hochleistungskeramiken, vielversprechende, aber schwierige Werkstoffe, Spektrum der Wissenschaft, 1/1993.
- (11) STRECK, W. R.: Chancen und Risiken neuer Werkstoffe für die bayrische Industrie, Ifo-Studien zur Industriewirtschaft 37, Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung e. V., München 1989.
- (12) TENNER, V. J.: Ceramics in Engines – An International Status Report, Ceramic Bulletin 68, 1989.