

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Startseite
Materialeffizienz & -substitution
Ressourcenaufbereitung & -anwendung
Universität Bayreuth

UNIVERSITÄT BAYREUTH

Der Lehrstuhl Keramische Werkstoffe an der Universität Bayreuth befasst sich mit der Entwicklung von neuen keramischen Werkstoffen und Bauteilen mit verbesserten thermomechanischen, physikalischen, chemischen und tribologischen Eigenschaften für verschiedene Anwendungsfelder unter Einsatz der verschiedensten Rohstoffe sowohl natürlicher als auch synthetischer Herkunft in Pulverform. Zusätzlich werden Ausgangsstoffe und Zwischenprodukte auf der Basis von präkeramischen Polymeren und faserartigen Verstärkungskomponenten für die Entwicklung und Herstellung keramischer Verbundwerkstoffe verwendet.

Diese Werkstoffe werden über pulverkeramische Techniken, die Pyrolyse flüssiger und fester metallorganischer Verbindungen oder durch reaktive Schmelzinfiltration (zum Beispiel Flüssigsilicierung) hergestellt. Bei den Herstellungswegen erfolgt die verfahrenstechnische Umsetzung von der Materialsynthese über den Werkstoff bis zum Bauteil. Materialentwicklung, Verfahrenstechnik, prozessbegleitende Charakterisierung, Gefüge- und Mikrostrukturuntersuchungen sowie die konstruktive Auslegung von Bauteilen werden am Lehrstuhl in modernen Laboranlagen und durch ein hochmotiviertes Team ausgeführt.

Der Lehrstuhl Keramische Werkstoffe ist durch seine Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten am Anfang der Wertschöpfungskette vom Rohstoff bis zum Produkt angesiedelt.

Verbundkeramik

Der Lehrstuhl beschäftigt sich mit allen Fragestellungen der keramischen Verbundwerkstoffe (Ceramic Matrix Composites, CMC), insbesondere mit der technologischen Umsetzung von Labormustern in bauteilrelevante Abmessungen. Hierzu stehen eine Reihe von Hochtemperatur-Ofenanlagen zur Verfügung, die den Temperaturbereich bis 2800°C abdecken und Bauteilgeometrien bis circa 300 mm in allen drei Raumachsen zulassen.

Technologische Schwerpunkte der Forschungsarbeiten bilden die Flüssigphasenverfahren LPI (Liquid Polymer Infiltration) und LSI (Liquid Silicon Infiltration), sowie davon abgeleitete Hybridverfahren. Außerdem stehen ingenieurmäßige Frage-

Kontakt



[cme\(at\)uni-bayreuth.de](mailto:cme(at)uni-bayreuth.de)
[Lehrstuhl Keramische
Werkstoffe](#)

stellungen wie Auslegungskriterien, Kennwertübertragung auf Bauteile, Verbindungstechniken, Beschichtungstechnologien sowie zerstörungsfreie Prüfverfahren im Vordergrund. Die Herstellung neuer CMC-Werkstoffe erfolgt meist in Zusammenarbeit mit institutionellen und industriellen Partnern.

Keramische Verbundwerkstoffe stellen eine neue Werkstoffklasse dar, deren Einführung in industrielle Märkte derzeit sehr erfolgreich verläuft. Auf Grund der guten tribologischen Eigenschaften, der extremen Temperatur- und Thermoschockbeständigkeit, der niedrigen Dichte (circa 2g/cm^3) und der sehr geringen thermischen Ausdehnung sind Faserkeramiken eine interessante Alternative zu herkömmlichen Materialien. Ihre im Vergleich zur klassischen Keramik deutlich höhere Bruchzähigkeit eröffnet vielfältige neue Anwendungsmöglichkeiten im Maschinen-, Fahrzeug- und Anlagenbau.

Die aussichtsreichste Möglichkeit, die Bruchzähigkeit der Keramiken zu verbessern, stellt die Einlagerung von Fasern dar. Im Unterschied zu einer Kunststoff- oder Metallmatrix liegt bei keramischen Verbundwerkstoffen die Bruchdehnung der Matrix in der gleichen Größenordnung wie die der Fasern. Primäres Ziel der Faserverstärkung von Keramiken ist daher weniger eine Erhöhung der Festigkeit, sondern vielmehr die Darstellung eines aus sprödbrechenden Einzelkomponenten bestehenden Verbundwerkstoffes. Dieser bricht pseudo-plastisch und weist hohe massenspezifische Eigenschaften über einen breiten Temperaturbereich auf. Anforderungen aus der Raumfahrt und der Militärtechnik spielten ursprünglich die entscheidende Rolle bei der Entwicklung der CMC-Werkstoffe. Insbesondere in Triebwerken und Thermalschutzsystemen von Raumtransportern und Raketen werden diese Materialien unter meist sehr aggressiven und extremen Umgebungsbedingungen eingesetzt, die von keinem anderen Strukturwerkstoff ertragen werden können. Die Einsatzdauer ist jedoch meist kurz und reicht von einigen Minuten bis zu wenigen Stunden.

Die Entwicklung der keramischen Verbundwerkstoffe erzielte in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte, insbesondere hinsichtlich des Eigenschaftsprofils und einer kosteneffizienten Herstellung. Die Fertigung der keramischen Verbundwerkstoffe kann prinzipiell nach einer Vielzahl von Verfahren erfolgen, wobei sich jedoch nur wenige Prozesse für eine industrielle Produktion eignen. Alle Verfahren basieren auf der Imprägnierung eines Fasergerüsts. Dazu kann grundsätzlich zwischen einer Gasphasen- und einer Flüssigphasen-Infiltration unterschieden werden. Technische Bedeutung zur Herstellung von CMC-Materialien erzielten bisher nur die Gasphaseninfiltration (CVI-Verfahren), die Pyrolyse siliciumorganischer Polymere (LPI-Verfahren) und das Flüssigsilicierverfahren (LSI-Verfahren).

Das Flüssigsilicierverfahren gilt vor allem unter Kostenaspekten als das vielversprechendste Verfahren für Industrieprodukte. Der Aufbau der keramischen Matrix erfolgt durch die Flüssigphasen-Infiltration von schmelzflüssigem Silicium in poröse Kohlenstoff-Fasergerüste mit anschließender

Umwandlung zu SiC. In einem ersten Verfahrensschritt wird zunächst ein kohlenstofffaserverstärktes Kunststoffteil hergestellt, dessen Matrix aus einem Kunstharz mit hohem Kohlenstoffgehalt besteht. Nach der Aushärtung der Matrix wird diese durch Pyrolyse in Kohlenstoff umgewandelt, wobei ähnlich wie beim LPI-Verfahren durch Volumenschrumpfung eine rissbehaftete Mikrostruktur entsteht. Im dritten Verfahrensschritt erfolgt eine Infiltration der porösen Kohlenstoffpreform mit Silicium, das größtenteils zu Siliciumkarbid umgewandelt wird. Als Endprodukt des dreistufigen Prozesses liegen C/C-SiC-Werkstoffe vor. Sie bestehen aus lasttragenden Kohlenstofffasern und amorphem Kohlenstoff (C) oder aus kristallinem Siliciumkarbid (SiC) als Matrixkomponenten. Die wesentlichen Vorteile des LSI-Verfahrens bestehen darin, dass durch die Variation der aufgeführten Parameter die Eigenschaften der resultierenden C/C-SiC-Werkstoffe gezielt beeinflusst werden können. Zudem ist jeder Fertigungsschritt nur einmal zu durchlaufen. Dadurch ergeben sich relativ kurze Prozess- und geringe Ofenbelegungszeiten – ein vor allem aus wirtschaftlichen Überlegungen wichtiger Verfahrensaspekt. Die Kosten für das C/C-SiC-Endprodukt sind vergleichsweise niedrig, weil als Rohstoff kommerziell erhältliche C-Fasern und preisgünstige Precursorwerkstoffe, etwa Phenolharze, verwendet werden können. Das wirkt sich auch auf die Wirtschaftlichkeit positiv aus.

Die Zusammensetzung und die Eigenschaften der C/C-SiC-Werkstoffe können über Prozessparameter und insbesondere über die Faserarchitektur des CFK-Bauteils gezielt eingestellt werden. Allgemein gilt, dass mit zunehmender Faserlänge die Festigkeiten steigen und hohe Faservolumenanteile im CFK zu geringeren Keramikgehalten und damit höheren Bruchzähigkeiten führen. Gewebeverstärkte Faserkeramiken mit hohen Fasergehalten weisen folglich die höchsten Festigkeiten und damit hohe Sicherheitsreserven im Bauteil auf. Aus kosten- und fertigungstechnischen Überlegungen kommen überwiegend Kurzschnittfasern zum Einsatz. Aufgrund der kürzeren Taktzeiten bei der CFK-Formgebung sowie der verschnittfreien Fertigung sind hier wesentlich geringere Herstellungskosten möglich.

Im C/C-SiC-Gefüge überwiegt meist volumenmäßig der Kohlenstoff- gegenüber dem Keramikanteil, um einerseits einer Versprödung des Materials entgegenzuwirken und andererseits den Carbon/Carbon(C/C)-Charakter, das heißt die hohen Festigkeiten und die überwiegend positiven tribologischen Eigenschaften der C/C-Werkstoffe zu erhalten. Durch die Silicierung sind C/C-SiC-Werkstoffe generell dichter (Porosität unter 3,5 %) und spezifisch schwerer als reine Carbon Verbundwerkstoffe. Übliche Keramikgehalte von 30 bis 60 Gewichtsprozent erhöhen die Wärmeleitfähigkeit gegenüber vergleichbaren Carbon/Carbon, während die Festigkeiten und Steifigkeiten in der gleichen Größenordnung liegen.

Die Anwendungsgrenzen heutiger Faserkeramiken werden primär durch die Oxidations- und Temperaturbeständigkeit der eingelagerten Fasern vorgegeben. Die üblicherweise

verwendeten Kohlenstofffasern setzen ab einer Temperaturbelastung von 450°C eine inerte Atmosphäre voraus. Fasern auf Siliciumcarbid-Basis hingegen sind wesentlich unempfindlicher gegenüber Oxidation. Ihre maximale Temperaturbelastung ist jedoch durch eine zunehmende Kriechneigung auf circa 1000°C begrenzt. Neue Faserentwicklungen beispielsweise auf der Basis von Si-B-C-N versprechen aufgrund ihrer Atmosphäre eine wesentlich höhere Temperaturstabilität. Sie bieten damit langfristig die Aussicht, CMC-Werkstoffe in der Energieerzeugung einsetzen zu können. Bis derartige Fasern in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, können erste Erfahrungen im Heißgasteil einer Gasturbine mit voll oxidischen CMC-Werkstoffen gesammelt werden.

Im Vergleich zu Metallen verhalten sich die CMC-Werkstoffe immer noch relativ spröde, ihre Bruchdehnung liegt jedoch um rund eine Größenordnung über derjenigen von monolithischen Keramiken. Auch wenn ein Vergleich mit Grauguss wegen des völlig unterschiedlichen Gefüges nicht zulässig ist, kann in erster Näherung die Schadenstoleranz der Faserkeramiken mit diesem metallischen Werkstoff verglichen werden. Für den mit Metallen vertrauten Konstrukteur sind die keramischen Verbundwerkstoffe sehr spröde. Für den Keramiker eröffnen CMC-Werkstoffe aufgrund ihrer Bruchzähigkeit jedoch völlig neue Anwendungsgebiete. Allerdings ist das Wissen um den materialgerechten Einsatz dieser CMC-Werkstoffe noch nicht sehr verbreitet. Der Lehrstuhl verfolgt daher in der Lehre das Ziel, Studenten mit Regeln zur Bauteilgestaltung sowie für das keramikgerechte Konstruieren von CMC-Bauteilen vertraut zu machen und veranstaltet darüber hinaus Fortbildungsseminare zu diesem Thema.

Für Faserkeramiken mit einer Matrix aus Siliciumcarbid und Verstärkungsfasern aus Kohlenstoff (C/SiC beziehungsweise C/C-SiC-Werkstoff) erfolgt derzeit die Markteinführung mit ersten Serienprodukten. Größere Stückzahlen sind jedoch nur dann erzielbar, wenn in Zukunft die Produktionskosten auf unter 250,00 Euro/kg gesenkt werden können. Neben volumenbedingten Rationalisierungseffekten kommt der Entwicklung von seriengerechten Qualitätssicherungsverfahren eine große Bedeutung zu. Die Kosten- und Qualitätssicherungsaspekte speziell für das LSI-Verfahren sind deshalb ebenfalls ein Forschungsthema des Lehrstuhls.

Neben den klassischen Leichtbauanwendungen in der Luft- und Raumfahrt eröffnen sich für CMC-Werkstoffe auch Anwendungen auf anderen Gebieten des Maschinen-, Fahrzeug- und Anlagenbaus. Gehäuse für optische Systeme, Gleitlager für Großpumpen, Chargiergestelle für die Wärmebehandlung, Kalibrierplatten für Koordinatenmessgeräte oder Leichtbaupanzerungen sind aktuelle Beispiele erfolgreicher Produktentwicklungen für den terrestrischen Einsatz.

Die Entwicklung der faserkeramischen Bremsscheiben für Straßenfahrzeuge sowie von C/C-SiC Reibbelägen für Not-Aus-Bremsen, Crashanlagen und Aufzugsanlagen demonstrieren

das einzigartige Eigenschaftsprofil dieser Werkstoffe, das den heutigen Stand der Technik deutlich übertrifft.

Precursorkeramik

In den letzten Jahren wurden zwei Precursorsysteme so weiterentwickelt, dass sie die entsprechenden material-, verfahrens- und anwendungsspezifischen Anforderungen für die genannten Anwendungen erfüllen. Die Synthese beider Precursorsysteme basiert auf der Umsetzung von lediglich zwei kommerziell erhältlichen Chlorsilanen mit Ammoniak und führte einerseits zu einem dünnflüssigen (0,05 Pas), ohne Lösungsmittel verarbeitbaren Polysilazan, das mit einem radikalischen Initiator bei milden Bedingungen (120 °C) vernetzbar ist und eine keramische Ausbeute von 75 % liefert. Die Modifizierung der Reaktionsbedingungen führt andererseits zu einem schmelzbaren Polymer (Erweichungspunkt circa 100 °C).

Des Weiteren können durch verschiedene organische Reste am Silazangerüst die Zusammensetzung und hier insbesondere der Kohlenstoffgehalt der Precursoren variiert werden, was einen großen Einfluss auf den Beginn und die Art der Kristallisation der amorphen Keramiken hat.

Durch die molekulare Anknüpfung von metallorganischen Verbindungen des Typs $[M(NR_2)_4]$ ($M = Ti, Zr$) an das Silazangerüst von flüssigen Precursoren kann einerseits ein variables M/Si-Verhältnis eingestellt werden, andererseits ist es aber auch möglich, über die Reaktionstemperatur den Vernetzungsgrad zu steuern. Bei geeigneter Reaktionsführung erhält man ein festes, in gewöhnlichen organischen Lösungsmitteln (Toluol, THF, Hexan) lösliches aber unschmelzbares Polymer, das aufgrund seiner ungewöhnlichen Haftung auf verschiedensten Materialien sehr gut zur Herstellung polymerer und keramikartiger Schichten geeignet ist.

Es lassen sich aus den festen, löslichen SiCN-Precursoren Lösungen herstellen, die sich hervorragend zum Beschichten einer Vielzahl von Substraten (Metalle, Keramiken, Glas, Kunststoffe) mit einfachen Verfahren aus der Lackiertechnik (Tauchen, Sprühen) eignen. Insbesondere auf Kunststoffen, Glas und Metallen mit oxidischer Oberfläche ist die Haftung der selbst synthetisierten Precursoren hervorragend. Eine Modifizierung der noch polymeren, transparenten Schichten führt zu stark hydrophoben (Selbstreinigung) oder sehr hydrophilen (Antibeschlag) Oberflächen, die zudem auf Kunststoffen wie Polycarbonat die Kratzbeständigkeit wesentlich verbessern.

Durch eine entsprechende Temperaturbehandlung lässt sich der Keramisierungsgrad der Schichten stufenlos und auf die jeweilige Anwendung abgestimmt einstellen. Neben der Ausbildung einer entsprechenden SiCN-Keramikschicht kann insbesondere im Fall von Titan eine bis zu 50 µm dicke Gradientenschicht, die aus kristallinen Titanitriden, -carbiden

und -siliziden besteht, durch die Reaktion des Precursors mit dem Metall erzeugt werden. Dieser graduelle Übergang verhindert ein Abplatzen der Schicht auch unter extremen thermischen Wechselbelastungen und führt zu einer Erhöhung der Oberflächenhärte auf den dreifachen Substratwert sowie zu einer wesentlichen Verbesserung des Verschleißverhaltens. Im Falle von Stahl führt die Ausbildung einer dünnen Diffusionschicht zu einer Steigerung der Oxidationsbeständigkeit bis zu Einsatztemperaturen von 1000 °C.

Keramische SiCN-Fasern: Zur Verstärkung keramischer Faserverbundwerkstoffe werden nach wie vor hauptsächlich Kohlenstofffasern eingesetzt. Diese zeichnen sich durch ihre hervorragenden mechanischen Kennwerte und ihre Temperaturstabilität aus, die jedoch nur in Inertgasatmosphäre gewährleistet ist, da bereits ab 400 °C eine merkliche Oxidation einsetzt. Es wurden daher große Anstrengungen unternommen oxidationsstabile keramische Oxid- und Nichtoxidfasern zu entwickeln und herzustellen. Für Einsatztemperaturen oberhalb von 1300 °C eignen sich jedoch nur nichtoxidische Keramikfasern auf Basis von SiC(N,B).

Am Lehrstuhl wurde ein preiswertes, industriell herstellbares Polycarbosilazan entwickelt, das sowohl eine geeignete Schmelztemperatur, als auch die entsprechenden rheologischen Eigenschaften seiner Schmelze aufweist, um daraus über ein Schmelzspinnverfahren zunächst Polymerfasern herzustellen. Mit einer selbst entwickelten Spinnapparatur werden die Polymerfasern auf Rollen gewickelt und anschließend industriell mittels Elektronenstrahlhärtung in weniger als 2 Sekunden in ein unschmelzbares Polymer überführt. Die Umwandlung zu SiCN-Keramikfasern erfolgt kontinuierlich in einem speziell umgebauten Rohrofen. Bereits im jetzigen Stadium der Entwicklung entsprechen die Kennwerte dieser Keramikfaser denen der vergleichbaren kommerziellen Produkte. Da alle Prozessschritte aufeinander abgestimmt sind, bietet dieses Verfahren ein hohes Potenzial für eine kostengünstige Herstellung der SiCN-Keramikfasern.

Herstellung von keramischen Matrices: Zur Herstellung von CMCs über den LPI-Prozess (Liquid-Polymer-Infiltration) eignen sich insbesondere dünnflüssige und bei niedrigen Temperaturen vernetzbare Precursoren. Hierfür wurde am Lehrstuhl ein einfach herzustellendes, preisgünstiges Silazan entwickelt. Dieses eignet sich aber nicht nur zum Aufbau von porenarmen Matrices in CMCs, ebenso ist die Infiltration von Kohlenstoffmaterialien zum Oxidationsschutz und von porösen Sintermetallen zur Herstellung von Keramik-Metall-Verbundwerkstoffen möglich.

Pulvertechnologie

Schwerpunkt der Forschungsarbeiten des Lehrstuhls bei der Herstellung pulverkeramischer Werkstoffe ist der Bereich Aufbereitung und Formgebung. Hierbei kommt es auf ein sehr präzise abgestimmtes Verhältnis zwischen verfahrens-

technischer Durchführung und den für die jeweiligen Prozessschritte optimierten organischen Additiven an. Der Lehrstuhl leistet Beiträge zu der gesamten Prozesskette von der Synthese polymerer Additive, der Modifizierung von Partikeloberflächen, über die Weiterentwicklung von Formgebungsverfahren bis hin zur Optimierung von keramischen Formteilen. Dabei steht immer die Wechselwirkung zwischen anorganischen Partikeloberflächen und den organischen Prozessadditiven im Mittelpunkt der Aktivitäten. Die Untersuchungen werden mit einer Vielzahl von Messmethoden zur Charakterisierung der jeweiligen Verfahrensschritte begleitet, um einerseits ein grundlegendes Verständnis der komplexen Vorgänge zu erarbeiten und andererseits Ansatzpunkte für die Optimierung industrieller Prozesse zu identifizieren.

Organische Additive, wie zum Beispiel Dispergatoren kommen bei der Nassaufbereitung keramischer Massen die größte Bedeutung zu. Je feiner die keramischen Pulver werden, desto wichtiger wird das Verhindern von Agglomerationseffekten, die bereits bei der Herstellung oder auch während des Transports der Rohstoffe eintreten können. Durch die Adsorption dieser Substanzen werden Kräfte erzeugt, die die Zerlegung von Agglomeraten bewirken.

Außerdem muss erreicht werden, dass einmal dispergierte Partikel auch getrennt erhalten bleiben, wofür die schnelle Belegung der frisch entstandenen Oberflächen mit den Dispergatoren entscheidend ist. Dies entspricht einem Waschprozess, beispielsweise von Textilien, bei dem Schmutzpartikel vom Gewebe abgelöst und mit oberflächenaktiven Stoffen umhüllt werden, um eine erneute Anlagerung im Gewebe zu vermeiden. Besonders effizient wirken polymere Additive, da die Wechselwirkung statistisch mit der Zahl der Kopplungsstellen im Molekül zunimmt. Am Lehrstuhl sind zu diesem komplexen Themenkreis Polymere speziell für Aluminiumoxid systematisch synthetisiert worden.

Im Bereich der Grundlagenforschung liegen die Entwicklungsziele unter anderem bei der Synthetisierung von Binderpolymeren, die dem Grünkörper zum einen pseudo-plastische Eigenschaften mit guter Kantenstabilität auf hohem Festigkeitsniveau verleihen, und zum anderen verschiedene Funktionen, etwa Binder- und Dispergatoreigenschaften verknüpfen. Die Entwicklung multifunktionaler Polymere, die aus Molekülkettensegmenten mit verschiedenen Funktionen bestehen, sind Gegenstand laufender Untersuchungen am Lehrstuhl.

Bei der Auswahl von organischen Additiven mit Binderfunktion kann ein wichtiges Kriterium die Recyclefähigkeit von Restschlickern, Granulatrücklauf oder Grünkörperbruch sein. Diese Restmassen können bei Verwendung geeigneter organischer Additive bereits durch Rühren wieder vollständig redispersiert und der Masseaufbereitung erneut zugeführt werden. Der Anteil solcher Rücklaufmassen beträgt üblicherweise etwa 10 %. Da in der Regel immer wässrige Systeme verarbeitet werden, kann eine vollständige

Redispergierung dann erreicht werden, wenn ausschließlich wasserlösliche organische Additive verwendet werden.

Aus dem Bereich der Bio- und Lebensmitteltechnologie werden vermehrt Dispergier- und Klassierverfahren in der Keramik übernommen, die oftmals nur bei geringen Feststoffkonzentrationen im Bereich von etwa 20 Gewicht-% (Gew.%) durchgeführt werden können. Bei der Weiterverarbeitung der Schlicker (Formgebung mittels Schlickerguss, Sprühtrocknung zur Granulatherstellung) sind jedoch Feststoffgehalte von 70 Gew.% erforderlich. Somit kommt der Reduzierung des Wassergehalts bei gleichzeitiger Vermeidung einer Reagglomeration der Partikel eine außerordentlich große Bedeutung zu. Mit Hilfe der Querstromfiltration (Cross-Flow-Filtration / CFF), die bereits in den Bereichen der Medizin-, Umwelt- und Lebensmitteltechnik eingesetzt wird, kann eine leistungsfähige und kostengünstige Aufkonzentration durchgeführt werden. Im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten werden am Lehrstuhl insbesondere die Wechselwirkungen zwischen keramischen Rohstoffen, organischen Additiven und Membranoberfläche untersucht, die in starkem Maße Filtrationsparameter wie Trennschärfe oder Permeatleistung beeinflussen.

In der Sanitär- und Geschirrkераmik hat sich seit etwa 10 Jahren der Druckschlickerguss etabliert. In diesem Falle werden Kunststoffformen verwendet, deren erhöhte Festigkeit gegenüber Gips es ermöglicht, hohe Schließkräfte während des Formgebungsprozesses zu erzeugen. Dadurch wird es möglich, den Schlicker mit bis zu 40 bar in der Form zu beaufschlagen. Die Folgen sind wesentlich bessere Produktionsraten durch erhöhte Scherbenbildung. Als weiterer Vorteil gilt eine verbesserte ökologisch ausgerichtete Fertigung, da die Sondermüllproblematik hinsichtlich der Gipsformenentsorgung entfällt. Im Bereich der Technischen Keramik zeigen die Projektarbeiten des Lehrstuhls, dass dieses Verfahren vor allem bei Aluminiumoxid ein hohes Potenzial zur Senkung der Herstellungskosten bei gleichzeitiger Verbesserung der Bauteileigenschaften besitzt.

Sowohl bei den Metallen als auch bei Kunststoffen ist es üblich, als Ausgangsmaterial für die gewünschten Formteile Halbzeuge wie etwa Stangen, Rohre oder Profile zu verwenden und diese einer weiteren Umformung beziehungsweise Nachbearbeitung durch Bohren, Drehen, Fräsen zu unterziehen. Da ein großer Bereich der Keramikherstellung aus Kleinserien besteht, wurden in den letzten Jahren vermehrt Aktivitäten gestartet, auch hier die Halbzeug-Verarbeitung (Grünbearbeitung) zu ermöglichen. In enger Kooperation mit der Industrie gelang dem Lehrstuhl die Einführung neuartiger Bindersysteme, die den Grünkörpern geeignete Festigkeit und Verformungseigenschaften für eine mechanische Nachbearbeitung verleihen.

Heute können auch komplexe Bauteile kostengünstig angeboten werden, da die kostenintensive Hart- oder Endbearbeitung mit Diamantwerkzeugen erheblich reduziert werden konnte oder teilweise auch vollständig entfallen kann.

Als Formgebungsverfahren wird derzeit primär das isostatische Pressen zur Herstellung von Halbzeugformaten eingesetzt. In Einzelfällen werden auch schlickergegossene Formteile, meist Hohlkörper, durch Drehen und Fräsen nachbearbeitet.

Mit Hilfe von organischen Additiven lassen sich verschiedene Problemstellungen beim Processing von keramischen Pulvern lösen. Entscheidend ist die genaue Kenntnis über die Wechselwirkungen zwischen Pulveroberfläche und der oberflächenaktiven Substanz. Begleitend zu allen projektbezogenen Arbeiten hat der Lehrstuhl hierfür in den letzten Jahren eine umfassende Messmethodik aufgebaut. Ein verbessertes Verständnis lässt sich mit der Elektroakustischen Schallanalyse (ESA) und rheologischen Meßmethoden (Rotations- und Oszillationsviskosimetrie) erlangen. Beide Meßmethoden können bei hohen Feststoffkonzentrationen angewandt werden.

Qualitätssicherung und zerstörungsfreie Prüfmethoden

Der Lehrstuhl Keramische Werkstoffe beschäftigt sich seit 2004 mit der Charakterisierung und Untersuchung von faserverstärkten Werkstoffen. Schwerpunkt ist die zerstörungsfreie mikrostrukturelle Untersuchung mittels Mikro-Computer Tomografie. Dabei kann in Kooperation mit der Fraunhofer Projektgruppe Keramische Verbundstrukturen (KVS) auf eine μ CT-Anlage zugegriffen werden, mit der Auflösungen im einstelligen Mikrometerbereich möglich sind.

Für die mikrostrukturelle Analyse von FVW mittels μ CT wurden am Lehrstuhl spezielle Algorithmen entwickelt, die zur Auswertung der Volumendatensätze verwendet werden können, beispielsweise für:

- die quantitative Bestimmung der vorhandenen Porosität, der Porengrößenverteilung und der örtlichen Verteilung der Poren;
- eine automatische Trennung einzelner Phasenanteile bei hoher Auflösung ($< 4 \mu\text{m}$), um beispielsweise Kurz- und Endlosfasern in FVW zu erkennen;
- die quantitative Bestimmung der lokalen und globalen räumlichen Faserorientierung sowie
- die Modellierung des Versagensverhaltens von FVW mittels der Finite-Elemente-Modellierung anhand von realen Volumendaten.

Die Entwicklung geeigneter Algorithmen für die Bestimmung der Faserorientierung aus Volumendatensätzen ist ein Schwerpunkt am Lehrstuhl. Bisherige Untersuchungen im Rahmen mehrerer Diplomarbeiten haben bewiesen, dass die Erkennung von Fasern und die Bestimmung der Faserorientierungen sehr gut möglich ist. Die Entwicklung schneller Algorithmen auf Basis des linearen Strukturtensor erlaubt die Bestimmung der lokalen und der globalen Faserausrichtung innerhalb weniger Minuten.

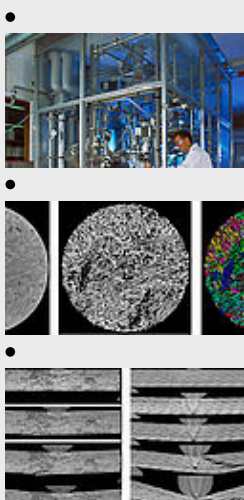
Dabei können die Faserorientierungen in beliebigen Materialzuständen (C/SiC, C/C oder CFK) bestimmt werden, die Orientierungsdaten können in beliebiger Formatierung abgelegt werden.

Eine Besonderheit der in Bayreuth verfügbaren CT-Anlage besteht darin, Bauteile unter Belastung zu beobachten. Die in-situ Belastungsvorrichtung erlaubt die Darstellung von Proben und Bauteilen beliebiger Geometrie unter extern aufgebrachten Belastungen, wie zum Beispiel mechanische Kräfte, Feuchteinflüsse, Temperaturänderungen (bis 1400°C) oder korrosiven Umgebungen. Dafür stehen spezielle Vorrichtungen zur Verfügung, mit denen die Bauteile während einer CT-Messung entsprechenden Belastungen ausgesetzt werden. Als Beispiel ist das Bruchverhalten von CFK-Proben unter 3-Punkt-Biegebelastung dargestellt.

Für die Finite Elemente-Modellentwicklung werden die ermittelten lokalen Orientierungsdaten in FE-Modelle überführt, um die reale Faserorientierung für eine Modellierung zu erhalten. Erste Modelle basieren auf quaderförmigen Elementen mit 8-Knoten (HEX8), die die Faserorientierung in Biegeproben abbilden. Dabei wird das Versagen der Probe simuliert und mit der realen Rissentwicklung anhand der in-situ Belastung verglichen.

Die Anpassung der Elementierung an beliebige komplexe Geometrien ist möglich. Dabei ist die Wahl der verwendeten Elementklasse wie beispielsweise Flächenelemente (QUAD4), Pyramiden (TET4), Quader (HEX8) beliebig verwendbar und abhängig von der gestellten Aufgabe.

Bildergalerie



Schliessen