

Expertenstudie

Zukunftspotenziale von Hochleistungskeramiken



Deutsche Keramische
Gesellschaft e. V.



VERBAND DER
KERAMISCHEN INDUSTRIE E. V.



Erfahrung · Kompetenz · Wissen
Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V.

Zukunftspotenziale von Hochleistungskeramiken

Herausgeber:

Deutsche Keramische Gesellschaft (DKG)
Am Grott 7, 51147 Köln

Verband der Keramischen Industrie e.V. (VKI)
Schillerstr. 17, 95100 Selb

Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM)
Senckenberganlage 10, 60325 Frankfurt

© DKG, VKI, DGM – Alle Rechte vorbehalten.

Bestellungen:

Deutsche Keramische Gesellschaft (DKG)
www.expertenstudie-hlk.dkg.de

Redaktion:

Dr. Bärbel Voigtsberger, Fraunhofer IKTS; Vorsitzende KA GA HLK DKG/DGM
Dr. Wolfgang Rossner, Siemens AG; Stellv. Vorsitzender KA GA HLK DKG/DGM
Dr. Reinhard Lenk, CeramTec; Technische Kommission VKI
Klemens Joachim, DGM

Layout & Gestaltung:

designerei - Werbeagentur
www.designerei-werbeagentur.de

Bildnachweis:

© Fraunhofer, © BOSCH, © ESK Ceramics, © Siemens, © CeramTec,
© WZR ceramic solutions, © Lithoz, © Siegert TFT,
© iStock.com / IPG Gutenberg UK Ltd., © iStock.com / fabrizio bernardi,
© iStock.com / querbeet, © iStock.com / wellphoto, © iStock.com / Lisa Valder

Druckerei:

Förster & Borries GmbH & Co. KG

Mai 2014

Printed in Germany



	Einführung und Zielsetzung	5
	Bedeutung von Hochleistungskeramiken	6
I	Hochleistungskeramiken für die Energietechnik	9
	Konventionelle Energieerzeugung / Wandlung	10
	Fokus Faserverstärkte Keramik	
	Energiespeicherung	13
	Fokus Stationäre Batteriesysteme	
	Erneuerbare Energien	17
	Fokus Magnetwerkstoffe	
II	Hochleistungskeramiken für Chemie, Maschinen- und Anlagenbau	20
	Fokus Strukturelle Anwendungen mit mechanischer, chemischer und thermischer Beanspruchung	21
	Fokus Funktionelle Anwendungen für chemische und biologische Verfahren	24
III	Hochleistungskeramiken für die Mobilität	27
	Neubewertung von Keramik in Verbrennungsmotoren	28
	Fokus Materialien und Fertigungsprozesse – Zuverlässigkeitskonzepte	
	Fokus Thermomanagement im Antriebs- und Abgasstrang	30
	Fokus Abgasreinigung von Nutzfahrzeug-Dieselmotoren	32
	Fokus Keramik für die Mobile Leistungselektronik	33
	Elektromobilität	34
	Fokus Batterietechnik	
IV	Hochleistungskeramiken für Elektrotechnik und Optik	36
	Fokus Passive Elektrische Bauelemente	37
	Fokus Lichttechnik	40
V	Hochleistungskeramiken für Life Sciences	44
VI	Querschnittstechnologien	50
	Prozesstechnik und Verfahrenstechnik	51
	Polymer- und Polymerabgeleitete Keramik	51
	Zellulare keramische Werkstoffe	53
	Additive Verfahren	55
	Feldunterstützte Sintertechnologien	56
	Lebensdauer und Zuverlässigkeit	58
	Material- und Prozessdiagnostik	60
	Materialmodellierung	62
	Fazit	63

Neue Werkstoffe können unbestritten wesentliche Antworten auf die Herausforderungen des 21. Jahrhundert geben. Sie helfen, unsere Ressourcen zu schonen sowie nachhaltige und bezahlbare Energieversorgung, Mobilität und Medizinversorgung zu gewährleisten.

Hochleistungskeramiken kommt auf Grund ihrer besonderen strukturellen und funktionellen Eigenschaften vor allem in stark thermisch, mechanisch und chemisch beanspruchten Anwendungen eine Schlüsselrolle zu.

Die vorliegende Expertenstudie behandelt wichtige Zukunftsfelder für den Einsatz von Hochleistungskeramiken und zielt auf die Intensivierung und Fokussierung der Forschungsanstrengungen in Deutschland. Zur Sicherung der international führenden Position der deutschen Hochleistungskeramik im globalen Wettbewerb werden entscheidende Handlungsfelder als Basis für weltweit führende Hochtechnologieprodukte und -systeme am Industriestandort Deutschland aufgezeigt.

Um besonders risikobehaftete und zukunftsorientierte Entwicklungen wirkungsvoll zu unterstützen und eine engere Vernetzung zwischen der interdisziplinären Grundlagen- und Vorlaufforschung und der anwendungsbezogenen Produkt- und Technologieentwicklung bis zur Systemintegration zu fördern und den erforderlichen wissenschaftlich-technischen Expertennachwuchs zu sichern, sind Fördermaßnahmen der öffentlichen Hand ein wesentlicher Baustein. Eine wettbewerbsfähige Industrie und ein gut verzweigtes Netzwerk von Bildungs- und Forschungseinrichtungen in Deutschland bieten dafür die solide Basis.

2025 **Expertennachwuchs** Ressourcen
Schlüsselrolle **Technologie** Entwicklung
Vorlauf **Hochleistungskeramik**
Deutschland **Forschung**
Wettbewerb
Zukunftspotenzial **Wissenschaft**
21. Jahrhundert **Industrie**

Einführung und Zielsetzung

Neue Materialien und deren adäquate Herstellung, Anwendung und Nutzung spielen eine herausragende Rolle besonders für die Lösung der Energiefragen der Zukunft^[1]. Dies betrifft zum einen die Veränderung des Energie-Mix mit dem Schwerpunkt bei der Reduzierung der CO₂-Emissionen und der Sicherung der Energieressourcen. Besonders im Fokus stehen aber auch effiziente und hinsichtlich der Kosten wettbewerbsfähige sogenannte ‚low-carbon‘-Technologien zur Sicherung der nationalen und europäischen Positionen im globalen Wettbewerb um die industrielle Führerschaft in Wirtschaft und Gesellschaft.

Hochleistungskeramiken kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu, da sie auf Grund ihrer besonderen strukturellen und funktionellen Eigenschaften vor allem in stark thermisch, mechanisch und chemisch beanspruchten Anwendungen schon heute essentiell für Funktionalität und komplexe Leistungsfähigkeit von technischen Systemen sorgen und dabei höchst anspruchsvollen Design-, Eigenschafts- und Zuverlässigkeitsanforderungen genügen müssen.

Hochleistungskeramiken sorgen als Schlüsselkomponenten schon heute essentiell für Funktionalität und komplexe Leistungsfähigkeit in technischen Systemen.

Bei Hochleistungskeramiken erstreckt sich der Innovationsprozess über eine lange und vielgliedrige Wirkungskette: Von der Synthese maßgeschneiderter Roh- und Ausgangsstoffe über multi-parametrisierte Herstellungstechnologien zur Gewährleistung der strukturellen und /oder funktionellen Materialparameter sowie der anwendungsbezogenen Wirtschaftlichkeits- und Zuverlässigkeitsaspekte bis hin zu den für die Applikation wesentlichen Fragen des Designs, der Systemintegration und Prüfung. Damit verbunden sind zunehmende Herausforderungen, aber auch Chancen für eine erfolgsbestimmende interdisziplinäre Zusammenarbeit sowohl zwischen den einzelnen Werkstoffdisziplinen, z.B. für komplexe Multimaterialansätze für die finale Systemintegration als auch zwischen den verschiedenen Anwendungsdisziplinen aus Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Chemie, Biologie, Medizin u.a..

Um die Entwicklungspotenziale der Hochleistungskeramik zeitnah zu erschließen und zum Nutzen von Gesellschaft und Industrie umzusetzen, ist eine zielgerichtete Vorgehensweise von hoher Bedeutung. Diese orientiert sich zum einen an den Zukunftseinschätzungen der Anwenderindustrien und zum anderen an den Technologievisionen der Forschung. Megatrend-Analysen^[2] und Roadmaps auf internationaler^[3], europäischer^[4] und nationaler^{[5][6]} Ebene bilden hierfür ein sinnvolles Instrument und zeigen die Bedeutung dieser stark wissensbasierten Branche für alle im Zusammenhang mit den Megatrends identifizierten Wachstumsfelder bis 2020 und darüber hinaus.

Im Hinblick auf die rasanten Entwicklungen des technischen und wirtschaftlichen globalen Wettbewerbs und vor allem unter dem Aspekt der Energiewende hat der Koordinierungsausschuss im Gemeinschaftsausschuss Hochleistungskeramik beschlossen, die 2008 publizierte Strategieinitiative^[5] zu aktualisieren. In applikationsfeldbezogenen Workshops mit industriellen und akademischen Experten aus Entwicklung, Fertigung und vor allem Anwendung wurden basierend auf Impulsreferaten der Anwenderindustrie Handlungsfelder der Hochleistungskeramik unter den Gesichtspunkten

Weiterentwicklung, Einsatz, Wettbewerbsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit diskutiert und im Hinblick auf das Marktpotenzial priorisiert. Zu diesen Fokusfeldern sowie für spezielle Anwendungsbereiche wurden nachfolgend vertiefende und ergänzende Expertengespräche geführt, um die Aussagen und Empfehlungen auf eine möglichst breite Wissensbasis zu stellen. Zusätzlich wurden relevante Roadmaps der letzten Jahre^[7] und aktuell laufende Arbeiten, wie z.B. im Bereich der Faserverbundmaterialien, mit einbezogen. Der gesamte Prozess wurde aus industrieller Sicht durch den Verband der Keramischen Industrie VKI e.V. und dessen Technische Kommission begleitet und unterstützt.

Als Ergebnis dieses mehrstufigen Prozesses beinhaltet die vorliegende Expertenstudie die aktualisierten Herausforderungen für die Grundlagen-, Vorlauf- sowie angewandte Forschung und Entwicklung für Hochleistungskeramiken in folgenden Applikations- bzw. Technologiefeldern:

- » Energie
- » Chemie, Maschinen- und Anlagenbau
- » Mobilität
- » Elektrotechnik und Optik
- » Life Sciences
- » Querschnittstechnologien

Bedeutung von Hochleistungskeramiken

Hochleistungskeramiken profitieren von einem Wachstum in etablierten und neuen Anwendungsgebieten und besitzen eine herausragende Bedeutung, da sie als Schlüsselkomponenten das Leistungsprofil von gesamten Systemen wettbewerbsentscheidend beeinflussen. Dies erfordert neben der reinen Materialkompetenz zunehmend tiefere spezifische Kenntnisse der jeweiligen Systemtechnologien der Anwendung, was die Rolle der Anwenderindustrie für die Ausrichtung der zukünftigen Entwicklung deutlich verstärkt und diese zunehmend zu eigenen Entwicklungen und teilweise sogar Fertigungen keramischer Systemelemente stimuliert.

Keramische Schlüsselemente sind in vielen Branchen seit Jahrzehnten etabliert und tragen dort auch über ihre Multiplikatorwirkung bzgl. des Verhältnisses von Komponentenwert zum Produktwert des Systems erheblich zum Geschäftswert längs der Wertschöpfungskette bei. Durch diese Wertsteigerung der Hochleistungskeramik innerhalb hochwertiger technischer Systeme, wie z.B. in Dieseleinspritzsystemen, Gasturbinen, Brennstoffzellen, ist der gesamte Marktwert aus der Summe direkter und indirekter Beiträge schwer bilanzierbar. Marktanalysen^[8] belegen, dass allein durch die Herstellung von keramischen Einzelkomponenten 2012 in USA und Europa ein Umsatz von 5,8 Mrd. EUR ohne Berücksichtigung des produktabhängigen Systemwerts dieser Komponenten erzielt wurde. Beispielsweise ist der Marktwert von keramischen Fräsern um den Faktor 20 höher als der Umsatzwert durch die keramischen Rohlinge.

Bei keramischen Membranen liegt der Faktor der Wertschöpfungssteigerung in Anlagen bei 5 bis 10. In anderen Bereichen leisten Komponenten aus Hochleistungskeramik bereits heute essenzielle überproportionale Beiträge zu technischen Lösungen z.B. im Bereich der nachhaltigen Mobilität und Energiewandlung, Energierückgewinnung sowie Medizin, wobei sich der Wertschöpfungsmultiplikator vom Material bis zur Sys-

temanwendung auf 2 bis 3 Größenordnungen und mehr belaufen kann. Piezokeramische Aktoren stellen beispielsweise dank ihrer Eigenschaft, schnelle, hochpräzise Positionierbewegungen im Nano- und sogar Subnanometerbereich bei geringem Energieaufwand zu erzeugen, die Basis dafür dar, Nanometer-Strukturbreiten in der Halbleitertechnik definiert fertigen zu können. Seit Jahren ist der beeindruckende Fortschritt der immer stärkeren Miniaturisierung und immer höheren Integrationsdichte moderner Halbleiterchips eng mit den Möglichkeiten der piezokeramischen Aktorik verbunden.

Nach einer aktuellen Studie^[9] belief sich das weltweite Marktvolumen für Hochleistungskeramik 2012 auf 46,5 Mrd. US\$ und wird entsprechend der Prognosen bis 2018 mit einer durchschnittlichen jährlichen Steigerungsrate von 6,18 % auf 68 Mrd. US\$ wachsen. Wegen starker Unterschiede bei internationalen und nationalen Statistiken zu Technischer Keramik/Hochleistungskeramik sind Vergleiche zu Europa und Deutschland nicht möglich. Grund hierfür sind unterschiedliche Definitionen und Datennahmen entlang der Wertschöpfungskette.

Keramische Schlüsselemente sind in vielen Branchen seit Jahrzehnten etabliert und tragen dort erheblich zum Geschäftswert längs der Wertschöpfungskette bei.

Festzuhalten ist, dass Deutschland in der Herstellung von Hochleistungskeramik die führende Position in Europa einnimmt. Dies belegt auch die Statistik des Verbandes der Keramischen Industrie e.V. (VKI), die für Technische Keramik einen Exportanteil von rund 61 %^[10] ausweist.

Die Marktdurchdringung für Hochleistungskeramik wird einerseits durch die Keramik herstellende Industrie bestritten und andererseits durch Keramik verarbeitende Industrien. So hat z.B. die Beschichtung metallischer Komponenten mit plasmagespritzten Wärmedämmschichten auf Basis keramischer Pulver essentielle Bedeutung für die Verbesserung des Wirkungsgrades von Gasturbinen. Aber auch ‚branchenfremde‘ Anwenderunternehmen werden zunehmend aktiv, indem sie Eigenentwicklungen für ihren Bedarf keramischer Komponenten für Systemanwendungen vornehmen und in der Folge auch interne Fertigungen einrichten, um sich Wettbewerbsvorteile zu sichern. Dies führt somit zu deutlich höherer Differenzierung und zunehmender Wettbewerbssituation der Industrie, die von der Positionierung des jeweiligen Unternehmens längs der gesamten Wertschöpfungskette bestimmt werden und auch die Ausrichtung des FuE-Bedarfes beeinflussen. Darüber hinaus führen kontinuierliche Steigerungen der Eigenschaftsprofile von Hochleistungskeramik auch dazu, dass andere Materialgruppen in diversen Anwendungsfeldern ergänzt oder substituiert werden wie z.B. optische Keramiken für mechanische, chemische und thermische Extremenanwendungen, für hochbrechende Linsen und Strahlungsdetektoren.

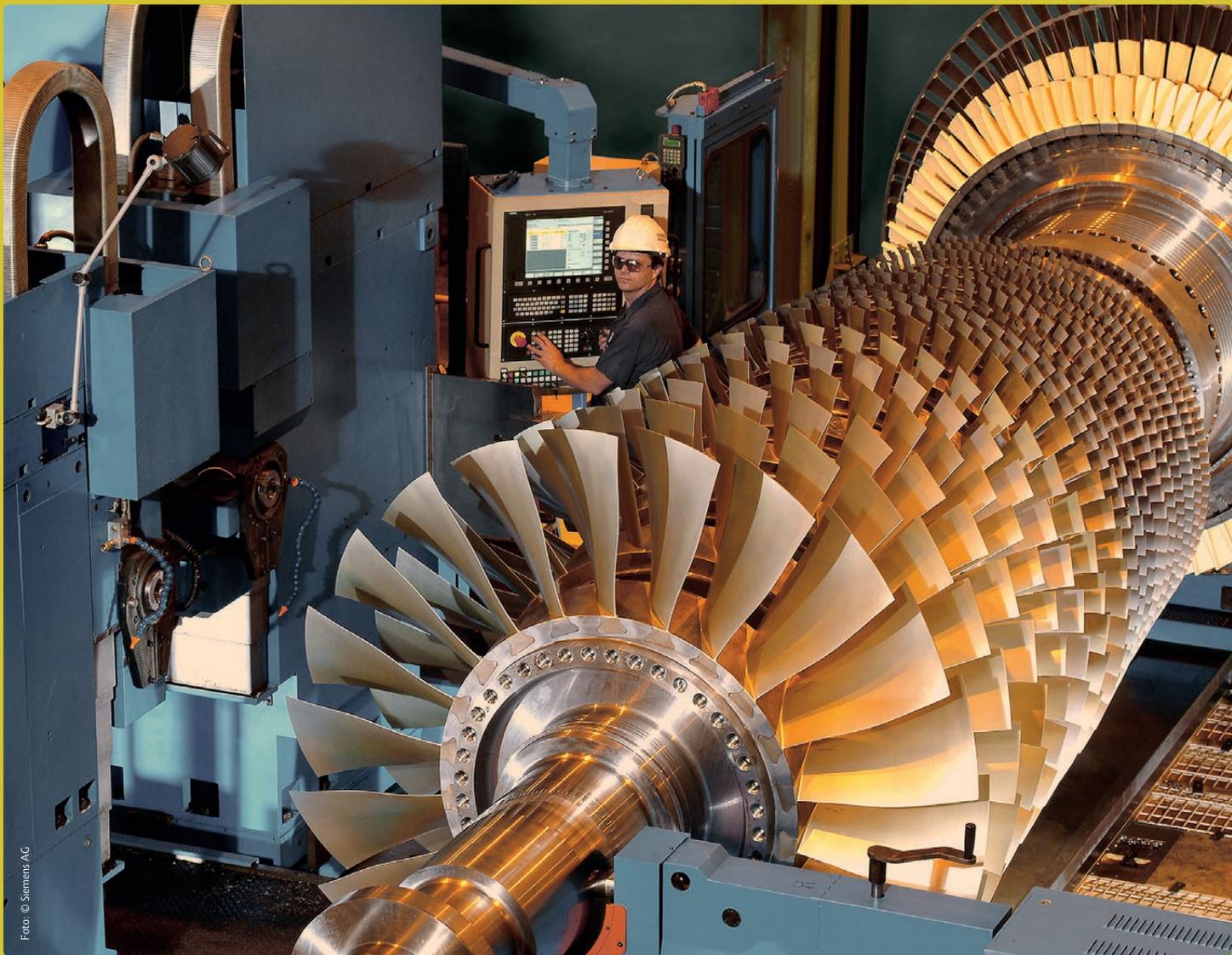
Über die ‚klassischen‘ monolithisch ausgeführten Hochleistungskeramiken hinaus besitzen insbesondere Komposite und Werkstoffverbunde mit keramischem Anteil hohes Innovationspotential und können zu einer erheblichen Erweiterung der Anwendungsgebiete führen, da sie zu neuen, bislang nicht realisierbaren Eigenschaftskombinationen führen.

Neben Marktanforderungen und Technologieentwicklung sind auch staatliche und gesetzliche Regelungen wirksame Treiber für die Ausrichtung der Entwicklung von Hochleistungskeramik. Strengere Umwelt- und Gesetzauflagen in Industrienationen und Schwellenländern insbesondere im Energie- und Umweltbereich erfordern nachhaltige Lösungen für höhere Wirkungsgrade bis hin zu ‚End-of-Life‘-Szenarien für Ressourcenschonung und Umweltentlastung.

Dies löst bei Herstellern und Anwendern zusätzliche FuE-Anstrengungen aus, die von der angewandten interdisziplinären Forschung im besonderen Maße getragen werden müssen. Betroffen davon sind zum Beispiel die stetige Verbesserung der Zuverlässigkeit und die Weiterentwicklung der Fertigungstechnologien für den Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus.

Die im Bereich der Hochleistungskeramik zum Teil relativ langen Innovationszyklen stellen ein besonderes Risiko für den wirtschaftlichen Erfolg im Hinblick auf die immer schnelleren Time-to-Market-Anforderungen gegenüber anderen Werkstoffklassen dar. Bedingt durch aufwendige Zuverlässigkeitstests auf der Anwenderseite verstärkt sich dieser Konflikt noch. Um dem entgegen zu wirken, erfordert es von Forschung und Industrie ein kontinuierliches und langfristiges Engagement und die Etablierung neuer effizienter FuE-Methoden, wie z.B. Hochdurchsatzentwicklung und ‚Integrated Computational Materials Engineering‘.

Hochleistungskeramiken für die Energietechnik



Das Anwendungsgebiet Energietechnik umfasst im Bereich konventioneller Technologien als auch bei regenerativer Energie eine große Vielfalt an Werkstoffherausforderungen. In einem Expertentreffen wurde dieser Breite Rechnung getragen und der Komplex Kraft-Wärme-Kopplung, Brennstoffzelle (SOFC), stationäre Gasturbine, Energieübertragung in Bezug auf regenerative Energiequellen und Energiespeicherung behandelt. Im Ergebnis wurden als wesentliche Fokusfelder Keramiktechnologien für die Gasturbinenanwendung im Heißgasbereich, für die stationäre Energiespeicherung sowie Magnetwerkstoffe für regenerative Energie priorisiert. Die mit hoher Keramikwertschöpfung verbundene SOFC-Brennstoffzellentechnologie wurde aufgrund ihrer fortgeschrittenen Marktreife und bereits erfolgter intensiver Förderung nicht ausdrücklich in die langfristige Ausrichtung dieser Studie einbezogen.

Konventionelle Energieerzeugung / Wandlung Fokus Faserverstärkte Keramik

Die mechanische Verstärkung von monolithischer Keramik durch die Einbringung von vorzugsweise keramischen Kurz- oder Langfasern hat die Erhöhung der Bruchzähigkeit und der Schadens- bzw. Belastungstoleranz zum Ziel. Bei der Typisierung ist zwischen oxidischen (z.B. Al_2O_3 -Fasern in Mullit-Matrix, sog. ox-ox-CMC) und nicht-oxidischen (z.B. SiC-Fasern in SiC-Matrix, sog. SiC-SiC-CMC) Faserkeramiken zu unterscheiden.

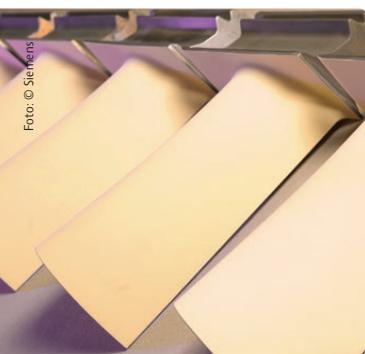
Wenn es gelingt, Faserkeramiken mit höherer Belastungsgrenze und –toleranz, sowie erhöhter Lebensdauer einzusetzen, könnte ein wesentlicher Beitrag zur Ressourcenschonung fossiler Energieträger und zum Klimaschutz geleistet werden.

Relevanz

Faserverstärkte Keramiken, auch als Ceramic-Matrix-Composites (CMC) oder Continuous Fiber Reinforced Ceramics (CFRC) bekannt, sind seit mehreren Jahrzehnten in intensiver Entwicklung und haben bereits in vereinzelt Anwendungen (z.B. Raumfahrt, Bremstechnik, Maschinenbau) Zugang zum Markt gefunden.

Im Bereich der Energietechnik werden Faserkeramiken seit den 1980er Jahren für den Einsatz in stationären Gasturbinen entwickelt. Hierbei gibt es Synergien mit den Entwicklungen für Flugzeugturbinen bezüglich Werkstoffauswahl und Prozesstechnik sowie Materialeigenschaften und –verhalten. Eine durchgehende breite Anwendung in stationären Gasturbinen und Flugturbinen steht noch aus. Vor kurzem hat General Electric (GE) angekündigt, SiC-SiC-CMCs erstmals in Flugzeugturbinen einzusetzen und im industriellen Maßstab herzustellen.

Für die Herstellung von Faserkeramiken stehen eine Reihe von Keramikfasern und angepasste Matrices sowie je nach Werkstofftyp unterschiedliche Herstellungsverfahren zur Verfügung, die sich insbesondere bei den thermischen Prozessschritten hinsichtlich nicht-oxidischer und oxidischer Faserkeramiken erheblich unterscheiden.



Gasturbinenschaufeln mit keramischer Wärmedämmschicht

Der Einsatz faserverstärkter Keramik im Heißgasbereich von Gasturbinen bietet das Potenzial, disruptive Verbesserungen der Effizienz der Energiewandlung durch die Erhöhung der Gaseintrittstemperatur und Reduzierung der Bauteilkühlung zu erreichen. Wenn es gelingt, Faserkeramiken mit höherer Belastungsgrenze und -toleranz, sowie erhöhter Lebensdauer zu vom Markt akzeptierten Preisen herzustellen und einzusetzen, könnte ein wesentlicher Beitrag zur Ressourcenschonung fossiler Energieträger und zum Klimaschutz geleistet werden.

Herausforderungen und Lösungsansätze

Die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen für den Hochtemperatureinsatz von faserverstärkter Keramik beziehen sich auf die thermischen und mechanischen Leistungseigenschaften, die anwendungsrelevante Auslegung für Werkstoff, Struktur und Komponenten sowie auf industriell umsetzbare Herstellungsverfahren.

Die Eigenschaftsanforderungen differenzieren zum Teil erheblich für Bauteile mit Temperaturbelastungen unter bzw. über ca. 1000 °C sowie für stationäre (z.B. Brennkammer, Flammröhre, Deckbänder, Leitschaufeln) und rotierende Komponenten (Laufschaufeln). Insbesondere im Höchsttemperaturbereich ist das Langzeitverhalten der Keramiken von entscheidender Bedeutung. Dies bezieht sich vor allem auf die thermische und strukturelle Stabilität sowie auf die Kriechfestigkeit der Faser, insbesondere für rotierende Bauteile. Für die Langzeitstabilität im Hochtemperaturbereich der gesamten Bauteile sind sowohl für nicht-oxidische als auch für oxidische Faserkeramiken zusätzliche Maßnahmen in Form von Schutzschichten erforderlich, um die thermische, oxidative und korrosive Belastung sicher zu beherrschen.

Ebenso ist das Fügen von faserverstärkter Keramik mit monolithischer Keramik im Temperaturbereich >1000 °C von Interesse, um die jeweiligen Stärken dieser Materialien im Einsatz gezielt zu nutzen. So können z.B. faserverstärkte Keramiken lokale Kräfte besser ausgleichen und Versagensrisiken minimieren. Für den industriellen Einsatz sind simulationsbasierte Designtools zur anwendungsgerechten Auslegung des Werkstoffaufbaus und der Bauteile erforderlich, deren Leistungsfähigkeit noch sehr eingeschränkt ist, da neben kompletten Werkstoffmodellen vor allem die Verfügbarkeit und Vergleichbarkeit der Werkstoffdaten bisher noch unzureichend gegeben sind.

Eine zentrale Herausforderung für langfaserverstärkte Keramiken sind automatisierte Herstellungsverfahren auch für komplex geformte Bauteile.

Eine zentrale Herausforderung für langfaserverstärkte Keramiken sind die Herstellungsverfahren, auch von komplex geformten Bauteilen, wie z.B. Schaufelgeometrien. Durch automatisierte Verarbeitungstechniken muss die Reproduzierbarkeit und Herstellungsqualität so verbessert werden, dass eine industrielle Großfertigung auch unter Wirtschaftlichkeitsaspekten möglich wird. Zur Leistungsverbesserung der Faserkeramiken müssen auch dreidimensionale Webverfahren der modernen Textiltechnik einbezogen werden, da zweidimensionale Gewebestrukturen für komplexe Belastungszustände geringe interlaminare Festigkeiten aufweisen.



Blick auf die Laufschaufeln mit Keramikbeschichtung

Darüber hinaus sind spezielle, auf die Faserkeramik angepasste Bearbeitungs- und Verbindungstechniken erforderlich, welche die Designanforderungen und Oberflächenqualitäten sowie den zuverlässigen Einbau in die Heißgasebene der Gasturbine ermöglichen.

Forschungsbedarf

Im Bereich der Fasern sind im oberen Temperaturbereich eine höhere thermische und chemische Langzeitstabilität bei Nichtoxid-Fasern sowie eine höhere Kriechfestigkeit bei Oxid-Fasern erforderlich.

Der Einsatz faserverstärkter Keramiken bei höchster thermo-mechanischer Belastung und mit hoher Zuverlässigkeit erfordert noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen längs der gesamten Technologie- und Wertschöpfungskette.

Vor dem Hintergrund der höchst komplexen Faser-Matrix-Beziehung stehen folgende Schwerpunkte im Vordergrund:

- » Gezieltes Grenzflächenengineering der Fasern
- » Verständnis zum Faserverhalten in der Matrix
- » Beschreibung der Eigenschafts-Mikrostruktur-Beziehung
- » Aufklärung der Versagensmechanismen für Lebensdauerprognosen
- » Erfassung und Beschreibung des Werkstoff- und Bauteilverhaltens in 3D-Belastungszuständen

Die simulationsbasierte Werkstoff- und Bauteilauslegung benötigt neben der generellen Modellentwicklung vor allem die Ermittlung und Verfügbarkeit werkstofflicher Eigenschaftsdaten, insbesondere durch standardisierte Material- und Strukturbeschreibung sowie standardisierte Charakterisierungsverfahren.

Für die Herstellungsverfahren sind Fortschritte im Bereich Automatisierung erforderlich, um Herstellqualität und Reproduzierbarkeit zu steigern. Verfahren für dreidimensionale Faserstrukturen benötigen Fortschritte, um Nachteile der Eigenschaftsanisotropie zweidimensionaler Faserausrichtungen zu überwinden.

Darüber hinaus können auch Konzepte für Reparaturtechnologien bis hin zu Selbstheilungsmechanismen eine zukünftige Bedeutung erlangen.



Gesamtturbine mit offenem Gehäuse

Energiespeicherung

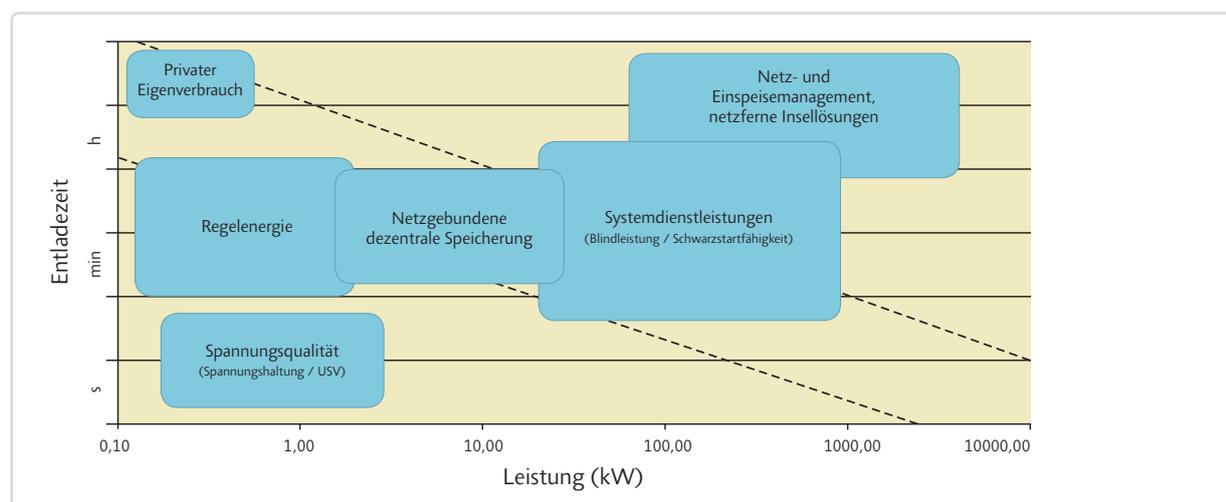
Fokus Stationäre Batteriesysteme

Relevanz

Unter stationären Stromspeichern werden in Abgrenzung zu mobilen (Elektromobilität) und portablen (Gerätebatterien) Anwendungen Speicher verstanden, die fest installiert sind und in der Regel an ein Elektrizitätsnetz angeschlossen werden. Eine hohe gravimetrische und volumetrische Leistungsdichte steht daher nicht im Vordergrund, vielmehr sind Kosten und Langlebigkeit im Sinne von Investitionsgütern die Optimierungsziele. Die Größenklassen möglicher Anwendungen reichen von ca. 1 kWh Speicherkapazität bis in den Bereich einiger 10 MWh bei Lade-/Entladezeiten von Sekunden bis Stunden. Eine Übersicht gibt die untere Abbildung.

Diese Anforderungen können nicht von einer Technologie allein erfüllt werden. Für den Bereich stationärer Speicher kommen Redox-Flow-Batterien und Lithium-Batterien, aber insbesondere die keramischen Natrium-Schwefel- und Natrium-Nickelchlorid-Batterien in Frage (NaS und NaNiCl).

Stationäre Stromspeicher sind eine der potenziell attraktivsten neuen Anwendungen für Hochleistungskeramiken und anorganische Funktionswerkstoffe. Im Fall von Batterien bestehen weit über 50 % des Speichersystems aus Keramik.



Übersicht über Anwendungen von Stromspeichern
Quelle: Fraunhofer IKTS

Herausforderungen, Lösungsansätze und Forschungsbedarf

Natrium-Hochtemperaturbatterien

NaS und NaNiCl-Batterien sind technisch eng verwandt. Die Speicherung von Gleichstrom beruht auf der anodischen Auflösung von metallischem Natrium bzw. seiner kathodischen Abscheidung bei der Aufladung. Zur Separation von Anode und Kathode werden jeweils Na-ionenleitende Festkörper-Elektrolyte auf Basis von keramischen Na-beta-Aluminaten eingesetzt, die eine Betriebstemperatur von ca. 300 °C erfordern. Als aktive Masse in der Kathode kommen granuliert und hinsichtlich Morphologie konfektionierte Pulvermischungen zum Einsatz, die auf Kohlenstoff/Schwefel bzw. Kochsalz und Nickel sowie leitfähigen Zusätzen und Dotierungsmitteln beruhen.

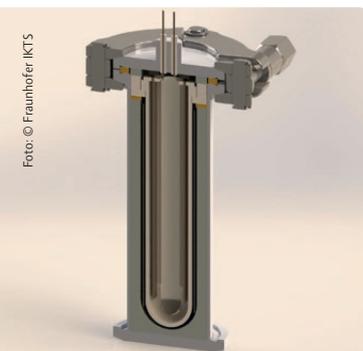
Na-basierte Batterien wurden in Deutschland bis in die 90er Jahre entwickelt, u.a. bei ABB (NaS) und AEG Anglo Batteries (NaNiCl) für die Anwendung in der Elektrotraktion. Durch das Aufkommen von Li-Akkumulatoren entfiel diese Anwendung. Stationäre Applikationen waren nicht absehbar, so dass die Technologie an ausländische Lizenznehmer veräußert wurde, was dazu führte, dass der internationale Stand der Technik heute von japanischen, US-amerikanischen und Schweizer bzw. italienischen Firmen dominiert wird, die Na-Batterien als Produkt vertreiben. Die weltweite jährliche Produktionskapazität liegt dabei kumuliert bei ca. 1 GWh. Von weiteren, insbesondere asiatischen Konzernen ist bekannt, dass sie eigene, offensive Entwicklungsprogramme haben. Das Kernprodukt sind jeweils Einzelzellen mit einer Zellspannung von 2.07 V (NaS) bis 2.58 V (NaNiCl). Die Kapazitäten liegen zwischen 25 Ah und 600 Ah bzw. 50 Wh bis ca. 1.5 kWh pro Zelle. Für Speicherblöcke im Bereich einiger 10 bis 100 kWh auf Basis dieser Zellen ergeben sich damit auf Systemebene gravimetrische Leistungsdichten im Bereich von 120 Wh/kg, die in einer Klasse mit Li-Batterien einzuordnen sind (140 Wh/kg) und sich drastisch von den schlechten Leistungsdichten z.B. der Bleibatterien abheben (40 Wh/kg).

Derzeit bewegen sich die Preise für solche Batteriesysteme im Bereich 500 bis 800 EUR/kWh. Dies ist bereits deutlich kostengünstiger als Li-Batterien, die auf Systemebene nach wie vor um 1000 EUR/kWh liegen.

Um in die Nähe heutiger Stromgestehungskosten zu kommen (ca. 5 Cent/kWh), muss das Batteriesystem entsprechend anwendungsbezogener Abschätzungen kostengünstiger als 300 EUR/kWh werden.

Betrachtet man den Aufbau von Na-Batterien, wird klar, dass noch erhebliches Kostensenkungspotential verfügbar ist. Die Materialgrenzkosten (Böhmit, Kochsalz, Natriumaluminiumchlorid, Nickel, Kohlenstoff, Edelstahl) liegen bei ca. 120 EUR/kWh. Die heute noch relativ hohen Kosten ergeben sich vor allem durch folgende Effekte:

- » extrem komplexe Formen und höchste geometrische Anforderungen der keramischen Elektrolyte
- » schlecht skalierbare, z.T. nicht optimal wirtschaftliche keramische Fertigungsverfahren
- » Kleinheit der Batteriezellen (40 ... 200 Ah pro Zelle) bedingt überkomplexe Verschaltung; anzustreben sind ca. 500 ... 1000 Ah.
- » Nickel kann auf Dauer zu einem Kostenhindernis werden



Modell einer 5 Ah-Batteriezelle auf Basis Na-beta-Aluminat

Eine wesentliche Herausforderung liegt in der Großflächigkeit der Produkte und in dem Übergang von $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ zu Metall. Elektrische Isolation, Korrosionsbeständigkeit, Degradation des $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ etc. sind noch nicht restlos gelöste Aufgaben. Für zukünftige Entwicklungen ergeben sich damit die Schwerpunkte:

- » Entwicklung neuer Elektrolytgeometrien für Na-beta-Aluminat mit großem Raumvolumen und einfachem Aufbau
- » Entwicklung hochproduktiver keramischer Fertigungsverfahren wie Druckguss, Extrusion und uniaxiales Pressen
- » Entwicklung von fertigungsintegrierten keramischen Prüf- und Qualitätsprozessen

Eine mittelgroße Fertigungsstätte für keramische Batterien von 500 MWh pro Jahr benötigt allein ca. 2000 Tonnen funktionskeramische Pulver und Komponenten jährlich.

Besondere Herausforderungen zur erfolgreichen industriellen Umsetzung stationärer Stromspeicher bestehen im Bereich hoch produktiver keramischer Fertigungsverfahren für neue Elektrolytgeometrien.

Zukünftige Potenziale für Batterien auf Basis von keramischen Festkörper-Ionenleitern ergeben sich durch folgende Entwicklungslinien, die forschungsseitig adressiert werden müssen:

- » Hochstrombatterien in planarer / bipolarer Bauweise. Keramische Ionenleiter und passive Komponenten werden durch Foliengießen hergestellt.
- » Ionenleiter, die bei niedrigeren Betriebstemperaturen arbeiten, z.B. NASICON-Gläser
- » Ionenleiter für andere Ionen als Na^+ , z.B. Lithium
- » Neue Kathodenmaterialien mit niedrigeren Kosten und längerer Lebensdauer, z.B. auf Basis Eisen
- » Aufbau- und Verbindungstechnik, z.B. Lote und Na-stabile Gläser

Lithium-Batterien

Lithium-Akkumulatoren werden derzeit in geringem Umfang und in kleinen Leistungen (wenige kWh) bereits zur Pufferung von Photovoltaik-Strom, unterbrechungsfreie Stromversorgung und andere Anwendungen angeboten. Der weitaus größte Anteil dieser Zellen wird für die Elektromobilität hergestellt. Li-Batterien in stationären Stromspeichern eignen sich insbesondere als kurzzeitiger Leistungspuffer.

Die Kosten liegen deutlich über denen von Na-Batterien bei derzeit ca. 1000 EUR / kWh und perspektivisch bei ca. 500 EUR / kWh (jeweils auf Systemebene). Es werden Leistungsdichten von ca. 140 Wh / kg erreicht, bei Ladezeiten im Minutenbereich bis max. 1 Stunde.

Die Charakteristik einer Li-Batterie wird von ihrer Chemie bestimmt. Die Anoden sind in den allermeisten Fällen kommerzieller Zellen aus Kohlenstoffmaterialien hergestellt. Für Kathoden stehen Lithium-Eisen-Phosphat als kostengünstige und sichere Lösung bzw. Mischoxide auf Basis Lithium/Cobalt mit Zusätzen von Mn, Al und anderen Übergangsmetallen zur Verfügung. Die Phasensynthese der oxidischen



Festelektrolyt-Keramikbauteile für stationäre Batterien

Kathodenpulver erfordert spezielles Know-how im Bereich Hydrometallurgie, Precursorchemie oder Mischoxidsynthese. Die Herstellung dieser Materialien im Maßstab von mehreren 10.000 Tonnen wird derzeit in Deutschland nicht industriell praktiziert. Dies wäre allerdings nötig, um zum internationalen Stand der Technik aufzuschließen.

Die Weiterverarbeitung der Pulver zu Elektroden erfordert eine äußerst exakte Einstellung der Pulvermorphologie, die oberflächliche Veredelung (Beschichtung) der Pulver sowie die Schichtbildung durch verschiedenste Gieß- und Flachextrudierverfahren unter Nutzung wässriger und nichtwässriger Bindersysteme. Die Tapes werden nachfolgend konfektioniert, z.B. durch Kalandrieren. Große Teile dieser Technologien beherrscht die Keramikindustrie bereits, da diese hinsichtlich der Maschinenkonzepte praktisch identisch mit der Herstellung von Vielschichtkeramik sind (Schlickerherstellung, Einstellung der Rheologie, Gießen, Trocknen, Vernetzen, Kalandrieren, Schneiden etc.).

Weitere Speichertechnologien

Es werden derzeit zahlreiche weitere Speichertechniken auf ihre Eignung als stationärer Speicher untersucht. Teils sind diese Konzepte sehr alt, teils noch im Stadium der Grundlagenforschung. Im Einzelnen sind als besonders relevant zu nennen:

- » Redox-Flow-Batterien
- » Metall-Luft-Zellen (Lithium-Luft, Zink-Luft etc.)
- » Lithium-Schwefel-Zellen

Der zukünftige Innovationsbedarf für leistungsfähigere Batterien bietet hervorragende Chancen für keramische Verfahrenstechniken.

Diese Zelltypen sind keine intrinsisch keramischen oder funktionskeramischen Produkte. Im Einzelfall können jedoch keramische Bauteile, insbesondere Funktionskeramiken, eine zentrale Rolle spielen. Zu nennen sind insbesondere Elektroden, die in großen Flächen und mit definierter Dicke hergestellt werden müssen, wie z.B. die Sauerstoffelektroden in Metall-Luft-Batterien. Dazu kommen Gießverfahren, uniaxiales Heißen und nachfolgend Kalandrierschritte zum Einsatz. Viele dieser Batteriesysteme arbeiten bei erhöhten Temperaturen (z.B. Li-Schwefel bei ca. 150 °C) oder in aggressiver chemischer Umgebung. Keramische Werkstoffe können daher oftmals ihre Stärken gegenüber Polymeren ausspielen, z.B. hinsichtlich der chemischen Langzeitstabilität oder der mechanischen Stabilität bei erhöhten Temperaturen. Keramiken werden daher oft als strukturbildendes Element in diesen Batteriekomponenten verwendet.

Bei allen zukünftigen Entwicklungen stationärer Stromspeicher können die bestehenden Technologiekompetenzen Keramik herstellender Unternehmen ideal eingebracht werden.

Erneuerbare Energien Fokus Magnetwerkstoffe

Bei regenerativen Energien stellt insbesondere der Bereich Windenergie neue und für die Keramiktechnologie attraktive Entwicklungspotentiale bei Hochleistungsmagneten dar, was zu einer entsprechenden Priorisierung dieser Thematik führte.

Relevanz

Die Entwicklung, Optimierung und Applikation von Magnetwerkstoffen ist ein zentrales Forschungsfeld in Deutschland, welches in seiner Breite von der Physik, Chemie, den Materialwissenschaften bis zu den Ingenieurwissenschaften, z.B. der Elektrotechnik, reicht.

Andererseits ist ein Bedarf an Magneten für moderne Technologien, wie z.B. die E-Mobilität und die Nutzung der Windenergie, zu erwarten. Daraus leitet sich die Notwendigkeit der Intensivierung der Aktivitäten auf diesem multidisziplinären Forschungsgebiet ab.

Im Bereich Hartmagnete ist davon auszugehen, dass der Bedarf zu jeweils etwa 50 % von Seltenerd magneten auf Basis von NdFeB, bzw. von Hartferriten abgedeckt wird. NdFeB-basierte Magnete werden insbesondere für Generatoren in Windkraftwerken in großen Mengen benötigt. Aufgrund von Engpässen in der Bereitstellung und der Preisentwicklung von Rohstoffen ist hier ein akuter Bedarf an der Entwicklung von Werkstoffen mit reduziertem Gehalt bestimmter Seltener Erden vorhanden. Dies ist von hoher Relevanz, da deutsche Firmen Seltenerd magneten in großen Mengen verarbeiten und einsetzen. In diesem Zusammenhang ist auch eine Wiederbelebung des Interesses an verbesserten Hartferritwerkstoffen zu beobachten. Diese Keramiken sollen in Motoranwendungen verstärkt Seltenerd magneten substituieren.

Im Bereich Weichmagnete ist ebenfalls mit einem steigenden Bedarf an neuen Werkstoffen zu rechnen, da z.B. im Bereich Elektroauto für das Batteriemangement neuartige Magnete für die Spannungswandlung, für die Abschirmung oder für neue Konzepte das Wireless Charging benötigt werden. Bei der weiteren Entwicklung der Solartechnik spielen DC/AC bzw. AC/DC-Wandler eine ebenso zentrale Rolle wie im Einsatz in Windkraftanlagen. Werkstoffseitig sind sowohl keramische Weichferrite, als auch FeCo-basierte Legierungen im Einsatz.

Herausforderungen und Lösungsansätze

Für die Gruppe der metallischen Seltenerd magneten besteht die große Herausforderung in der Erforschung neuer Zusammensetzungen mit reduziertem Seltenerd gehalt unter Beibehaltung der guten magnetischen Eigenschaften. Dabei spielt insbesondere die Verringerung des Dy-Gehalts eine zentrale Rolle. Reduzierte Nd-Gehalte werden im Konzept der Lean-Neo Exchange-Spring Magneten angestrebt. Die Entwicklung von Werkstoffen mit erhöhtem (nicht seltenem) Cer-Gehalt spielt ebenfalls eine wichtige Rolle.



Hartmagnete als essentielle
Keramikkomponenten für die
Windkraftenerzeugung

In der Gruppe der keramischen Hartferrite werden weltweit (aber besonders forciert im asiatischen Raum) Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die darauf abzielen, die magnetischen Eigenschaften (B_r , H_c , BH_{\max}) zu verbessern. Damit soll der Abstand zu den Eigenschaften der Seltenerd-magnete reduziert und ein verstärkter Einsatz von Hartferritmagneten ermöglicht werden. Dabei werden insbesondere die Kenndaten nassgepresster anisotroper Magnete verbessert. Dazu sind zunächst die werkstofflichen Grundlagen der Phasenbeziehung und Struktur-Eigenschaftsbeziehungen substituiertes Hartferrite weiter zu entwickeln. Da für Hochleistungsmagnete typischerweise La/Co-Substitutionen angewendet werden, ist die Suche nach alternativen, preisgünstigeren Substituenten ein zentrales Forschungsfeld. Das Mikrostruktur-Engineering dieser texturierten Magnete ist besser zu verstehen, die dazu erforderlichen werkstofflichen und technologischen Parametereinflüsse sind zu untersuchen. Neben der Optimierung der Ausrichtung der Partikel spielen dabei die Sinterung zur Ausbildung einer geeigneten Gefügestruktur sowie die Anpassung der gesamten Prozesskette eine herausragende Rolle. Ein weiterer Punkt ist die Erarbeitung von Verfahren zur Charakterisierung und Simulation der magnetischen Vororientierung (Alignment). Ein wesentlicher Aspekt ist die attraktive Gestaltung der Kostensituation, da Hartferrite stets in Konkurrenz zu SE-Magneten zu bewerten sind.

Verbesserte Magneteigenschaften im bisherigen Preisniveau oder reduzierte Preise bei bisherigen Leistungsmerkmalen sind die zentralen Entwicklungsziele.

Im Bereich der Weichferrite bestehen Herausforderungen in der Entwicklung neuartiger Materialqualitäten, die sich u.a. durch folgende Merkmale auszeichnen:

- » hohe Sättigungsflussdichte (Batterieladen für elektrische Fahrzeuge)
- » niedrige Verlustleistung (Inverter für erneuerbare Energieträger)
- » niedrige Verlustleistung bei hohen Frequenzen (0.5-5 MHz)
- » niedrige Verluste über breiten Temperaturbereich

In den letzten Jahren sind in den o.g. Kategorien beachtliche Verbesserungen erreicht worden. Dabei werden heute Materialkennwerte erreicht, die noch vor fünfzehn Jahren als utopisch galten. Für metallische Weichmagnete werden ähnliche Trends formuliert, welche die Werkstoffentwicklung prägen:

- » hohe Flussdichten zur Volumenreduzierung der Magnete
- » niedrige Verluste bei moderaten Frequenzen (bis 2 kHz)
- » Korrosionsstabilität der Weichmagnete

Die wesentlichen Lösungsansätze liegen dabei in einem vertieften Verständnis der Gefüge-Eigenschaftsbeziehungen als Grundlage für Mikrostruktur-Engineering.

Das vertiefte Verständnis der Wechselbeziehungen zwischen Zusammensetzung, Gefügestruktur, Dotierungen und Defekten auf die magnetischen Zielgrößen ist dazu unabdingbar.

Für die Anwendung von weichmagnetischen Ferriten in Multilageninduktivitäten sind ebenfalls werkstoffwissenschaftliche sowie prozesstechnische Fragestellungen zu beantworten. Für monolithische Multilayerinduktivitäten sind dabei insbesondere Werkstoffe möglichst hoher Permeabilität für mittlere und hohe Frequenzen (Spinnell und Hexaferrite) zu entwickeln. Verlustarme bzw. stromfeste Ferrite sind über spezielle Dotierungen zu realisieren. Die Integration von Multilayerinduktivitäten in LTCC-Module ist weiter zu entwickeln, da diese Module zunehmend in der Informatik und Elektronik Einsatz finden. Das Co-Firing von Multimaterialkombinationen ist zu verbessern. Es gibt auch Ansätze, zunehmend Ferrite als Substrate für Multilagen-Module, z.B. für DC/DC- bzw. AC/DC oder DC/AC-Wandler, zu nutzen.

Forschungsbedarf

Im Bereich der keramischen Hartmagnete lassen sich folgende Forschungsschwerpunkte erkennen, die werkstoffliche und prozesstechnische Fortschritte sowie gezieltere Entwicklungen durch höheres Verständnis der physikalisch-mikrostrukturellen Wirkmechanismen ermöglichen:

- » Substituierte Hexaferrite (Phasenbeziehungen, Kationenverteilung, Struktur-Eigenschaftsbeziehungen)
- » Ableitung von alternativen substituierten Zusammensetzungen (La/Co-frei; alternative hexagonale W-Typ Ferrite)
- » Optimierung der Pulverprozessierung zur Verbesserung der Ausrichtung der Partikel bei der Herstellung anisotroper Magnete
- » Untersuchung der Mikrostrukturausbildung/Sintern unter Einsatz von Dotierungen
- » Entwicklung von Technologien zur kostengünstigen Herstellung spezieller Magnetformen (dünne Magnete, Spritzguss, etc.)
- » Entwicklung alternativer Dauermagnetwerkstoffe, z.B. Fe-N
- » Bewertung Potential hart/weichmagnetischer nanoskaliger Magnetkomposite

Für weichmagnetische keramische Magnete ist folgender Entwicklungsbedarf zu erkennen:

- » Gefüge-Eigenschaftsbeziehungen in Weichferriten
- » Entwicklung von Weichferriten mit hoher Sättigungsmagnetisierung
- » Verlustleistungsarme Weichferrite für breite Anwendungstemperaturen
- » Ferrite für Multilageninduktivitäten mit geringen Verlusten/hoher Ansteuerung und Integration von Ferriten in LTCC-Module

Übergreifend ist Forschungsbedarf für Materialentwicklungen im Bereich magnetischer Materialien in Sensorik / Elektronik vorhanden:

- » Multiferroics (Materialien mit ferromagnetischen und –elektrischen Eigenschaften)
- » Alternative Applikationsfelder von Ferriten (Katalyse, Wasserspaltung, Magneto-elektrik)

Hochleistungskeramiken für Chemie, Maschinen- und Anlagenbau



Das Anwendungsfeld Chemie, Maschinen- und Anlagenbau ist in besonderem Maße gekennzeichnet durch eine große Breite der spezifischen Anforderungen an die keramischen Materialeigenschaften, aber vor allem durch wachsende Herausforderungen hinsichtlich Bauteildesign, kostengünstiger adäquater Fertigungstechnologien sowie der Systemeinbindung der keramischen Komponenten. Unabhängig von den jeweiligen konkreten Anwendungsbezügen wurden im Hinblick auf die zu erschließenden Zukunftspotenziale zwei Fokusfelder mit vorwiegend strukturellen bzw. funktionellen Beanspruchungen identifiziert und priorisiert.

Fokus Strukturelle Anwendungen mit mechanischer, chemischer und thermischer Beanspruchung

Relevanz

Im Maschinen- und Anlagenbau stehen Hochleistungskeramiken in sehr starkem Wettbewerb mit anderen Werkstoffklassen und sind aufgrund ihrer Kostenstruktur stets auf den Nachweis ihrer überlegenen Eigenschaften angewiesen. Grundlage dafür sind überdurchschnittliche technologische Neu- und Weiterentwicklungen ebenso wie eine gezielte Verbreitung des Anwendungsnutzens.

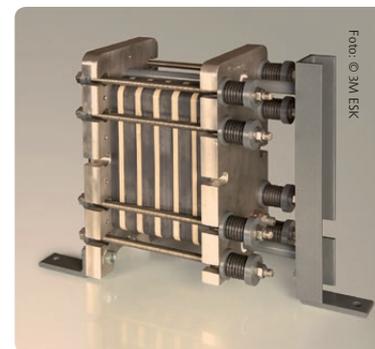
Der geschlossene Anwendungszyklus von der Erprobung eines Werkstoffes bis zum Nachweis seiner industriellen Einsetzbarkeit ist eine zwingende Notwendigkeit, um das Potenzial der Hochleistungskeramik für klassische Industriebereiche nutzbar zu machen.

Daher ist ein enger Austausch mit den Anwendungsindustrien notwendig, da wirk-same Entwicklungen nicht isoliert, nur von der keramischen Seite betrieben werden können. Vor allem gilt es, die Bereitschaft der Anwender für keramische Lösungen durch gezielte Informationen zu Design und Werkstoffentwicklung zu erhöhen. Andererseits muss auch in der keramischen Industrie ein Verständnis für die speziellen fertigungstechnischen Anforderungen bei der Weiterverarbeitung des keramischen Bauteils beim Anwender geschaffen werden. Schließlich muss die Einbindung in das Anlagensystem gelöst werden. Für keramische Werkstoffe unpassende Normen stellen mitunter ein Hindernis für deren Einsatz dar. Um diese Annäherungsschwierigkeiten überwinden zu können, sind gemeinsame, insbesondere öffentlich geförderte Entwicklungen wünschenswert, die von den Anwenderindustrien mitbetriebene gemeinsame Plattformen für den verstärkten Austausch nutzen.

Herausforderungen und Lösungsansätze

Der angesprochene Bereich weist eine sehr hohe technologische Breite und Tiefe auf, was sich z.B. in den aktuell 67 Fachverbänden des VDMA ausdrückt. Übergreifende Aussagen zu den Anforderungen dieser unterschiedlichen Anwendungsfelder und mögliche Bedarfe für keramische Lösungen lassen sich daher nur schwer gewinnen.

Beispielhaft sollen daher hier die Erkenntnisse aus der Expertendiskussion zu Pumpenanwendungen dargestellt werden.



Keramischer Mikroreaktor auf Basis von Siliciumcarbid

Typische Anwendungsfelder für Keramiken in Pumpenanwendungen sind:

- » Keramische Gleitlager, Dichtungen, Ventile und Regelemente zur Vermeidung von Verunreinigungen und Kontaminationen durch Abrieb
- » Keramische Hochleistungs-Gleitringdichtungen für Maschinen und Anlagen (Hydraulik-Pumpen) mit hohen Flüssigmediendrücken

Besondere Herausforderungen und Lösungsansätze ergeben sich unter folgenden Aspekten:

- » Inspektionsintervalle können durch spezielle neue Konstruktionen und Werkstoffneuentwicklungen verlängert werden.
- » Gleitlager müssen auch bei Mangelschmierung oder anderen schwierigen Bedingungen die zu erwartende Lebensdauer erreichen (höhere Robustheit). Dies könnte durch eine zusätzliche ‚dämpfende Wirkung‘ der Werkstoffe noch unterstützt werden.
- » Durch die politischen Entscheidungen der EU, bei Pumpen die EEI-Klassen zu erfüllen, besteht aktuell besonderer Bedarf an Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz. Trockenlauffähige Werkstoffe, die schmiermittelfreie und höher belastbare Lager und Dichtungen ermöglichen, können dieses Ziel der Pumpenindustrie unterstützen.
- » Werkstoffe müssen sich gleichzeitig tribologisch möglichst ideal verhalten und chemische, thermische sowie abrasive Beständigkeit aufweisen.
- » Für die Entwicklung neuer Pumpen stehen die Konvektionstoleranz der Pumpe, ein Design mit geringer bzw. keiner Leckage und die Ermöglichung höherer Drehzahlen zur Miniaturisierung aktuell im Fokus.
- » Weitere spezielle technische Fragestellungen betreffen z.B. Elektrokorrosion, für die die Anwenderindustrien nach einer robusten Materiallösung für Spezialanwendungen suchen.

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen sind weitere Materialinnovationen notwendig. So zeigen Kompositwerkstoffe, insbesondere keramisch gefüllte Polymere, erste vielversprechende Ansätze bzgl. der Reduktion von Reibwert und Gewicht bei gleichzeitig ausreichender chemischer und mechanischer Beständigkeit (z.B. Verschleiß). Da im Tribokontakt vor allem die Oberfläche relevant ist, sind Untersuchungen von Beschichtungen und gezielte geometrische Einstellungen der Oberfläche weiter notwendig. Für hoch belastete Lager und Dichtungen sollten die technologischen Lösungen Kostenstrukturen unterhalb derer von Diamantbeschichtungen gewährleisten.

In kritischen Pumpenanwendungen werden Wartungs- und Instandhaltungsintervalle inzwischen durch Fernüberwachung gelöst. Diesen Trend zu unterstützen und für keramische Werkstoffe zu nutzen (z.B. integrierte Sensorik), könnte die Verbreitung von Keramiken im Pumpenbereich weiter verstärken. Sinnvoll ist auch eine Standardisierung der Abmessungen und Formen. Preislich scheitert es heute oft an den Kosten für die speziell gefertigten kleinen Stückzahlen.



Keramisch gefüllter polymerer Kompositwerkstoff PolyCeram

Forschungsbedarf

Neben neuen Materialentwicklungen steigt zunehmend der Bedarf an spezifischen Prozessinnovationen zur Flexibilisierung der Produktion und hin zur Fertigung von komplexeren Bauteilen. Gleichzeitig muss sich die keramische Industrie dem steigenden Kostendruck stellen. Durch klare Positionierung im Markt haben keramische Unternehmen vor allem dann wirtschaftlichen Erfolg, wenn die Leistungsvorteile der Keramik gegenüber anderen Materiallösungen voll ausgeschöpft werden können.

Die Erfassung der ‚keramischen‘ Leistungsvorteile muss im Wettbewerb zu anderen Werkstofflösungen stets durch Bilanzierung des gesamten Lebenszyklus vom Rohstoff bis zum ‚End-of-Life‘-Szenario erfolgen.

Für zukünftige Werkstoffinnovationen wird diese Betrachtungsweise entscheidend sein und erfordert eine enge Vernetzung zwischen der meist mittelständischen Keramikindustrie in Deutschland, den industriellen Anwendern und den keramischen Instituten und Forschungseinrichtungen, was durch öffentliche Fördervorhaben außerordentlich zielführend gestaltet werden kann. Im Bereich der Prozesstechnik gilt es, prozesstechnische Lösungen so abzuwägen, dass sie trotz erforderlicher Spezifität eine hohe Flexibilität bei den zu investierenden Anlagen aufweisen. Der Bereich der Fertigung reicht dabei von kundenspezifischen Einzellösungen bis hin zu großen Serienproduktionen und von kleinen Komponenten im Mikrometerbereich bis hin zu großen Komponenten mit Dimensionen oberhalb einem Meter. Neue Keramikwerkstoffe werden häufig zunächst nur in Nischen Anwendung finden, was die Sicherstellung einer nachhaltigen Produktion oft erschwert. Flexible und wirtschaftliche Fertigungsprozesse zur Reduzierung der Fehlerquoten werden dabei für keramische Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau zunehmend wichtiger. Grundlagenentwicklungen zur Simulation der Prozessketten können hier bedeutende Beiträge leisten.

Durch den zunehmenden Bedarf der Energieeinsparung in der Keramikfertigung sind grundlegende Forschungsarbeiten zu den Energiebilanzen durch unterschiedlichen Materialeinsatz für eine bessere Bewertung notwendig.

Wie im vorherigen Kapitel soll hier exemplarisch der Forschungsbedarf im Maschinen- und Anlagenbau speziell am Beispiel von Pumpenanwendungen gezeigt werden:

- » Entwicklung von keramischen Werkstoffen, die die Erreichung der EU-Vorgaben zur Energieeffizienz von Pumpen unterstützen
- » Reibwertoptimierte Keramik-Werkstoffe (sowohl Oxide als auch Nichtoxide)
- » Reduzierung der beschleunigten Massen und höhere Drehzahl der Pumpen mit dem Ziel der weiteren Miniaturisierung
- » Forschung im Bereich des Einflusses des Werkstoffs auf die Kavitationsanfälligkeit der Pumpe
- » Werkstoffe für hochbelastete trockenlaufende Pumpen, speziell Verbundwerkstoffe Metall/Keramik oder Kunststoff/Keramik oder Werkstoffverbunde über einfache Kombinations-/ Füge-technik
- » Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss der Oberfläche und deren chemischer und struktureller Modifikation auf das tribologische Verhalten



Gaspumpe aus Keramik für Chlorgas und Gemische mit Chlorgas

- » Weiterentwicklung der Simulation dieser komplexen Systeme; Einbindung der keramischen Werkstoffe in das System mit Fragestellungen wie keramikgerechtes Design, fügegerechtes Design, Fügetechnik und Ausgleich der unterschiedlichen Materialeigenschaften
- » Reduzierung des Verschleißes im Bereich hochverschleißbeanspruchter Bauteile durch Beschichtungen und Verbunde
- » Keramische Herstelltechnologie
- » Vorhersage der Applikationseigenschaften mittels Simulation

Fokus Funktionelle Anwendungen für chemische und biologische Verfahren

Relevanz

Im Bereich der Verfahrenstechnik gehört die Stofftrennung zu den wichtigsten Prozessschritten. Hierzu zählen Verfahren wie Destillation, Rektifikation, Extraktion, Adsorption, Absorption und Membrantrennung. Keramische Materialien spielen insbesondere bei der Membrantrennung und der Adsorption eine wichtige Rolle, wobei der selektive Stofftransport durch definierte Porengrößen und Porositäten sowie durch spezifische Wechselwirkungen mit der Materialoberfläche ermöglicht wird. Sie haben sich in wässrigen Anwendungen für die Mikrofiltration, Ultrafiltration und Nanofiltration vor allem in folgenden Einsatzgebieten bewährt:

Keramische Membranen sind im Vergleich zu Polymermembranen chemisch, thermisch und mechanisch sehr stabil.

- » Sterilisierung und Klarfiltration von Getränken in der Lebensmittelindustrie (Milch, Wein, Saft)
- » Abwasserbehandlung, vor allem bei kleinen, hochbelasteten Abwasserströmen in der Chemie und Pharmazie
- » Badpflege in der Metallverarbeitung und im Maschinenbau (Öl/Wasser-Emulsionen, Reinigungsbäder)
- » Produkttrennung und Produktreinigung (z.B. Caseinabtrennung aus Milch)

Deutschland ist auf dem Gebiet der Herstellung von Keramikmembranen sehr gut etabliert. Allein 9 der weltweit etwa 20 Membranhersteller sitzen in Deutschland und stellen zusammen etwa 40.000 m² Membranen pro Jahr mit einem Jahresumsatz von ca. 20 Mio. EUR her.

Sechs universitäre und außeruniversitäre Institute beschäftigen sich mit der Entwicklung keramischer Membranen. Die Membranen werden in Anlagen verbaut, wobei die damit verbunden Umsätze bei einem Faktor 5 - 10 (100 - 200 Mio. EUR / Jahr) liegen.

Bei den Adsorbentien sind es vor allem die Molekularsiebe (Zeolithe), die als Granulate oder Formkörper für die Abgasreinigung, Gastrennung (O₂/N₂) und Trocknung eingesetzt werden.



Montage eines Zeolith-Membran-Moduls

Herausforderungen und Lösungsansätze

Mit der Abkehr von der Kernenergie und unter Berücksichtigung der Klimaziele, die sich Deutschland gestellt hat, gewinnen die Greentech-Themen:

- » Nutzung regenerativer Energiequellen
- » Energieeffizienz
- » Kreislaufwirtschaft
- » Material- und Ressourcenschonung
- » Abwasserreinigung und Wasseraufbereitung
- » Emissionsminderung und Abluftreinigung

erheblich an Bedeutung. Jeder dieser Schwerpunkte ist eng mit dem Thema Stofftrennung verbunden. Im Unterschied zu bisher etablierten Lösungen verlagert sich die Stofftrennung stärker in Richtung der Gastrennung und hierbei wiederum zu höheren Temperaturen. Das eröffnet ein hohes Potenzial für selektive keramische Materialien, das bereits 2020 bei 1-2 Zehnerpotenzen über dem Umsatz der keramischen Membran heute liegen wird. Herausforderungen bestehen zum Beispiel für:

- » Entwässerung von Bioalkohol (Ethanol, Butanol)
- » selektive Abtrennung von Alkohol aus verdünnten wässrigen Lösungen
- » Abtrennung von Glukose aus dem sauren Aufschluss von Lignocellulose
- » Aufkonzentrierung von Biogas zu Bioerdgas und Einspeisung ins Erdgasnetz
- » Trocknung von Erdgas
- » Sauerstoffabtrennung aus Luft und Nutzung für Wirkungsgradsteigerung und Emissionsminderung in Verbrennungsprozessen sowie für Oxycoal- und Oxyfuel-Verfahren
- » Wasserstoffabtrennung aus Synthesegas nach der Wassergasshiftreaktion
- » Stofftrennung im organischen Lösemittel
- » Wertstoffrückgewinnung aus Abwasser und Abluft
- » Teilstrombehandlung mit Kreislaufschließung kombiniert mit Verringerung von Wärmeverlusten
- » Trinkwasseraufbereitung in Entwicklungsländern und Krisengebieten.

Innovative Lösungsansätze liegen in der Entwicklung keramischer Materialien, die selektiven Stofftransport für Gase bei gleichzeitig hoher thermischer Stabilität bis zu 1000 °C ermöglichen.

Hier werden neue Prinzipien der Porenbildung und des Stofftransportes verwendet, wie z.B.:

- » definierte kristallographische Poren z.B. in Gerüstsilikaten (Zeolithe)
- » freies Porenvolumen in amorphen Oxiden (SiO_2) und Nichtoxiden (Kohlenstoff, Si-C-N)
- » gemischte Leitfähigkeiten für Ionen und Elektronen (O^{2-} -/e⁻-Leitfähigkeit in Perowskiten, H⁺/e⁻-Leitfähigkeit in Wolframaten und Tantalaten).

Die damit verbundenen Herausforderungen auf dem Gebiet der Keramik- und Technologieentwicklung liegen in:

- » Verringerung der Herstellungskosten für Adsorbentien und Membranen
- » neue Syntheseprozesse
- » automatisierbare und skalierbare Herstellung
- » neue Messmethoden zur Charakterisierung der Materialien (Qualitätssicherung)
- » Membrananlagen für die Gastrennung mit sicherer Beherrschung hoher Temperaturen

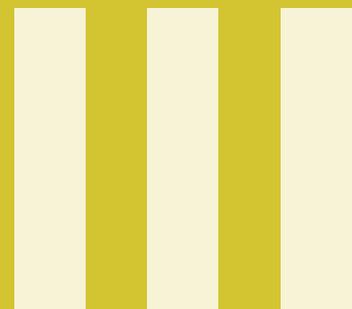
Forschungsbedarf

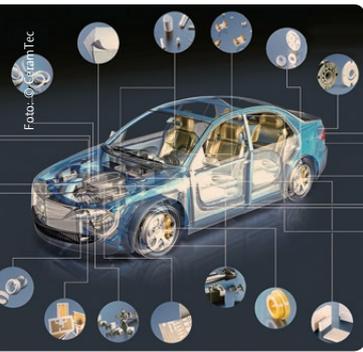
Forschungsbedarf besteht sowohl bei den Materialien für keramische Membranen und Adsorbentien für die Hochtemperaturanwendung als auch bei kostengünstigen zuverlässigen Technologien und vor allem der Implementierung in der chemischen Verfahrenstechnik.

Aus den anwendungsspezifischen Herausforderungen leitet sich umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf ab, der sowohl Aspekte bei den Materialien als auch bei kostengünstigen zuverlässigen Technologien und vor allem der Systemintegration, der Anwendungs- und Verfahrenstechnik betrifft. Folgende Schwerpunktaufgaben wurden identifiziert:

- » Verbesserung der Selektivität von Membranen und Adsorbentien ohne Einschränkung der Produktivität
- » Nanoporöse Membranen für die Gastrennung
- » Organophile Membranen für die Nanofiltration und Pervaporation
- » Adsorptionsselektive Membranen
- » Membranen mit gemischter Leitfähigkeit für Sauerstoffionen und Elektronen
- » Membranen mit gemischter Leitfähigkeit für Protonen und Elektronen
- » Fügeverfahren Keramik/Keramik und Keramik/Stahl
- » Keramische Membrangeometrien mit hoher volumenspezifischer Membranfläche zur signifikanten Reduzierung der spezifischen Membrankosten
- » Neue Modulkonzepte
- » Höhere Durchsatzleistungen der Membranen und Adsorbentien bei geringerem Energieaufwand
- » Kombination der Membrantrennung und Adsorption mit anderen Trenn- und Anreicherungsverfahren
- » Kombination von Membrantrennung und Reaktion in einem Apparat (Membranreaktor)

*Hochleistungskeramiken
für die Mobilität*





Vielfältiger Einsatz keramischer Komponenten in der Automobiltechnik

Hochleistungskeramiken mit herausragenden funktionellen und strukturellen Eigenschaften sind seit vielen Jahren erfolgreich in großen Stückzahlen in der Automobiltechnik im Einsatz. Prominente Beispiele dafür sind u. a. Piezokeramiken für Abstands- und Klopfensoren, keramische Folien zur Herstellung von Hybriden in elektronischen Steuerungssystemen, Bauteile für Kühlwasser- und Kraftstoffpumpen, um nur einige zu nennen.

Die strategischen Zielstellungen zum Ausbau der Elektromobilität haben in den letzten Jahren umfangreiche Förderinitiativen der Bundesregierung initiiert, weshalb dieser Fokus hier mit Ausnahme der Batterietechnologien nicht näher behandelt wurde. Vielmehr richtet sich das Augenmerk der Experten im Kontext dieser Studie auf Zukunftspotenziale von Hochleistungskeramiken im Bereich der konventionellen Antriebstechnik in Straßenfahrzeugen (Verbrennungsmotoren, Leistungselektronik).

Neubewertung von Keramik in Verbrennungsmotoren Fokus Materialien und Fertigungsprozesse – Zuverlässigkeitskonzepte

Relevanz

Der zunehmende Handlungsdruck, der aus gestiegenen Emissionszielen von Verbrennungsmotoren für Kraftfahrzeuge resultiert, führt zu einem erhöhten Interesse der Automobilhersteller, keramische Komponenten im Antriebs- und Abgasstrang zu integrieren.

Das Ziel ist es, früher entwickelte keramische Lösungskonzepte mit dem heutigen Wissen über Hochleistungskeramiken und Fertigungsprozesse neu zu bewerten, um in Anbetracht der heute gültigen Rahmenbedingungen die Vorteile aus technischer und vor allem wirtschaftlicher Sicht zu ermitteln.

Herausforderungen und Lösungsansätze

Ein wesentlicher kritischer Erfolgsfaktor für den potenziellen Einsatz keramischer Komponenten im PKW-Bereich ist das Verhältnis von zusätzlich entstehenden Kosten und realisierbarer CO₂-Einsparung. Für die Bewertung der Herstellungsprozesse stehen neben den Kosten Fragen der Zuverlässigkeit keramischer Komponenten im Fokus.

Materialeitig können die Anforderungen heutiger Applikationen erfüllt und unter Laborbedingungen realisiert werden. Es fehlt jedoch ein effektiver Transfer in die Serienproduktion. Eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen serienmäßigen Einsatz ist die technisch und wirtschaftlich begründete Motivation seitens der Entwicklung, keramische Komponenten im bereits maximal optimierten Gesamtsystem Motor einzusetzen. Hierfür muss in interdisziplinärer Kooperation mit FuE-Einrichtungen und Keramikherstellern der fortgeschrittene Stand stabiler Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozesse zugrunde gelegt werden. Zusätzliche Herausforderungen besonders unter Kosten- und Zuverlässigkeitsaspekten müssen identifiziert werden.

Für eine umfassende technische und wirtschaftliche Neubewertung muss die gesamte Wertschöpfungskette, bei den Rohstoffen beginnend, betrachtet werden. Dabei sind nicht nur die Material- und Fertigungskosten zu berücksichtigen, sondern vor allem auch der technische Fortschritt in Betracht zu ziehen. Ausgehend von den einzelnen Komponenten umfasst dies den Nachweis ihrer Zuverlässigkeit über die Lebensdauer sowie weitere Möglichkeiten zu ihrer Verbesserung. Darüber hinaus müssen die aktuellen prozesstechnischen Möglichkeiten der Keramikhersteller beleuchtet und Potenziale zur Verbesserung der Fertigung keramischer Komponenten und ihres Transfers in die Applikation ermittelt werden. Die Simulationstechnik bietet für alle genannten Punkte vielerlei Möglichkeiten, die es zu nutzen gilt, um einerseits Prozesse wie auch Bauteile selbst zu bewerten.

Die Vertiefung der Erkenntnisse zur anwendungsbezogenen Auswahl keramischer Werkstoffe ist für die Integration von Hochleistungs-keramik-Komponenten im Automobil unerlässlich.

Neben der Neubewertung keramischer Komponenten müssen jedoch auch Hemmnisse seitens der Automobilhersteller berücksichtigt werden, im hochentwickeltesten System Verbrennungsmotor tiefgreifende Veränderungen vorzunehmen. Ein erfolgversprechender Ansatz für die Keramikhersteller könnte es sein, zunächst die Vorteile keramischer Komponenten zu erarbeiten und diese anschließend mit eigenen Prototypen nachzuweisen. Mit nachgewiesenen zuverlässigen Bauteilen wäre die Integration dieser Komponenten in eine Neuentwicklung wie beispielsweise einen Einzylindermotor, der in kleiner Stückzahl gefertigt wird, denkbar. Auf diesem Weg können praktische Erfahrungen mit der Serienfertigung der Komponenten sowie deren Integration in den Motor gesammelt und Prozesse weiter für den Großserieneinsatz qualifiziert werden. Entscheidend für den Erfolg hierbei sind die Zusammenarbeit von Werkstoff- und Motorenexperten sowie eine kontinuierliche Prozessentwicklung.

Ein weiterer Ansatz, die Integration keramischer Komponenten zu forcieren, besteht in der Vertiefung der Erkenntnisse zur anwendungsbezogenen Auswahl keramischer Werkstoffe mit standardisierten Eigenschaften unter Berücksichtigung keramikgerechter Konstruktionsprinzipien und zuverlässiger Herstellungstechnologien. Hier ergeben sich Herausforderungen im Bereich der Ausbildung, aber auch der interdisziplinären Forschung und Entwicklung. Ziel muss eine einfachere Handhabung und Berechenbarkeit des Werkstoffs Keramik für Konstrukteure sein.

Forschungsbedarf

Im Sinne der Neubewertung des Keramikeinsatzes in Verbrennungsmotoren ist folgende Vorgehensweise sinnvoll:

- » Ermittlung der ökonomischen und technischen Vorteile
- » Nachweis der Zuverlässigkeit einzelner Komponenten über die Lebensdauer
- » Nachweis der technischen Vorteile in Prototypen
- » Demonstration keramischer Komponenten in Kleinserie, insbesondere bei Neuentwicklung

Dabei werden die Erfolgsaussichten im Wesentlichen von der interdisziplinären Zusammenarbeit von Werkstoff-, Prozess-, Simulations-, und Motorenexperten sowie Kaufmännischen und Marketing-Experten, vom Nachweis der Zuverlässigkeitsanforderungen, von einer kontinuierlichen Prozessentwicklung und der Standardisierung der betrachteten Keramikwerkstoffe abhängen.

Fokus Thermomanagement im Antriebs- und Abgasstrang

Relevanz

Ausgehend von steigenden Anforderungen an die Reduktion der CO₂-Emissionen sehen Experten Potenziale für verschiedene Einsatzmöglichkeiten von Keramik in fossilen Antrieben. Trotz Effizienzverbesserungen in den vergangenen zwei Dekaden weicht der tatsächliche durchschnittliche CO₂-Ausstoß je Kilometer immer noch deutlich von den offiziellen Herstellerangaben ab. Das ist im Wesentlichen auf den Bestand älterer Fahrzeuge sowie auf die Abweichungen der tatsächlichen Fahrprofile von den Testfahrprofilen zur Ermittlung des CO₂-Ausstoßes für die Fahrzeugzulassung zurückzuführen. Zentrale Ansatzpunkte für signifikante Effizienzsteigerungen liegen nach Experteneinschätzungen in der Reduktion von Reibungs- und Wärmeverlusten. Mit Kosten von ca. 20 bzw. 100 EUR je Gramm CO₂-Emissions-Reduktion für Benzin- und Dieselmotoren sieht sich die Branche jedoch einem immensen Kostendruck gegenübergestellt. In Anbetracht der sich wandelnden Rahmenbedingungen und des daraus resultierenden Drucks zur weiteren Steigerung der Effizienz und Verringerung der Emissionen gewinnt der Einsatz innovativer Materialien weiter an Bedeutung. Seitens der Anwender besteht eine zunehmende Bereitschaft zu entsprechenden Investitionen in diesem Bereich. Hochleistungskeramiken bieten vielversprechende Potenziale, die häufig materialeitig limitierte Effizienz zu steigern.

Herausforderungen und Lösungsansätze

Das Themenfeld Thermomanagement im Antriebs- und Abgasstrang fokussiert den Einsatz von keramischen oder hybrid-keramischen Beschichtungen mit speziellen thermischen Eigenschaften zur Isolation von Bauteilen, aber auch für einen verbesserten Wärmeabtransport.

Der Einsatz von anpassungsfähigen, intelligenten Beschichtungen gewinnt zunehmend an Bedeutung.

Im Bereich der fossilen Antriebe werden Einsatzbereiche vor allem in der gezielten Isolation von bestimmten Bereichen des Abgasstranges gesehen, um höhere Abgas-temperaturen in der Nachbehandlung realisieren zu können. Darüber hinaus ist der Einsatz derartiger Komponenten bzw. Beschichtungen zur Isolation des Brennraumes ein vielversprechender Weg, um mit einem möglichst adiabaten Brennraum deutliche Verbesserungen des Wirkungsgrades von fossilen Antrieben zu erzielen. Neue Werkstoffe für Bauteile oder Beschichtungen dieser Art sollten eine besonders niedrige Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität aufweisen, um den Weg zur sogenannten ‚Temperatur-Swing-Insulation‘ zu bereiten, die einerseits besonders gute

thermisch isolierende Eigenschaften hat und andererseits hochfrequente Temperaturwechsel abbilden kann. Die Effekte einer derartigen Lösung bieten ein Potenzial von drei bis vier Prozentpunkten Leistungssteigerung.

Durch eine weitere Isolierung des motorfesten Abgasstranges würde nicht nur das Kühlsystem wesentlich entlastet, in das derzeit 30 % bis 40 % der Gesamtwärme aus dem Verbrennungsbereich eingetragen werden, sondern auch die Abgasnachbehandlung deutlich verbessert, da die Enthalpie des Abgases nicht an den Motorraum verloren wird und somit für die Abgasnachbehandlung zur Verfügung steht. Da ein Großteil der Emissionen vor Erreichen der Betriebstemperatur des Katalysators ausgestoßen wird, birgt dieser Punkt ein wesentliches Potenzial zur Reduktion der Schadstoffemissionen.

Im Bereich der Elektromobilität ist der Einsatz neuer Beschichtungen zur Ummantelung der Batterie vorstellbar. Um eine möglichst gute Kühlung der Batterie zu ermöglichen, sollte eine derartige Beschichtung eine gute Wärmeleitfähigkeit sowie eine besonders niedrige elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Weitere Anwendungsmöglichkeiten am Rande des Themenfelds liegen im Bereich des Gesamtfahrzeug-Thermomanagement. Hier ist vor allem der Einsatz adaptiver Beschichtungen interessant, die entsprechend der Umgebungsbedingungen eine energieeffiziente Klimatisierung des Fahrzeuginnenraumes ermöglichen.

Forschungsbedarf

Für die erfolgreiche Entwicklung von Werkstoffen für das Thermomanagement ist es von Bedeutung, dass die Anforderungen an den Werkstoff, respektive die Beschichtung anwenderseitig eindeutig spezifiziert werden und dass von Seiten der Materialentwicklung der Nachweis der Zuverlässigkeit über die Lebensdauer hinweg erbracht werden kann. Hierzu sollten die Entwicklungsziele und Parameter aus der Simulation des Gesamtsystems abgeleitet werden, um die zielgerichtete Forschung nach neuen Werkstoffen zu ermöglichen. Ein weiterer erfolgskritischer Punkt ist die frühzeitige Berücksichtigung prozesstechnischer Anforderungen, um einen schnellen Technologietransfer in die Anwendung und Serienproduktion zu gewährleisten. Folgende Anforderungen sind an neue Keramikwerkstoffe zu stellen:

- » besonders niedrige Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität zur Isolation von Brennraum und Teilen des Abgasstranges
- » besonders gute Wärmeleitfähigkeit und niedrige elektrische Leitfähigkeit zur Beschichtung von Batterien in Elektrofahrzeugen
- » anpassungsfähige, intelligente Beschichtungen

Eine erfolgreiche Entwicklung muss auch folgende Aspekte berücksichtigen:

- » anwenderseitige Spezifikation der Werkstoffanforderungen und Entwicklungsziele
- » Nachweis der Zuverlässigkeit über die geforderte Lebensdauer
- » frühzeitige Integration prozesstechnischer Aspekte

Fokus Abgasreinigung von Nutzfahrzeug-Dieselmotoren

Relevanz

Besonders im Nutzfahrzeubbereich wird dem Thema Abgasnachbehandlung eine hohe Bedeutung beigemessen, da für höhere Hubraumvolumina die Kosten der Abgasanlage bereits die Kosten des Motors überschreiten können. Kernkomponenten wie Dieselpartikelfilter und SCR-Katalysator (Selektive Katalytische Reaktion) basieren auf keramischen monolithischen Wabenkörpern. Als Träger des Aktivmaterials, aktuell überwiegend aus Cordierit gefertigt, kommen auch Aluminiumtitanat- und Siliciumcarbid-Wabenkörper sowie Sintermetalle zum Einsatz. Gegenüber herkömmlichen Cordierit-Filtern zeigen Siliciumcarbid-Filter Vorzüge wie beispielsweise eine vierfach höhere Kapazität für Rußbeladung, eine 21-fach höhere Wärmeleitfähigkeit und höhere mechanische und Temperaturbelastbarkeit. Diese Eigenschaften ermöglichen die Erreichung der Entwicklungsziele, Vermeidung von Filterschäden durch Brechen oder Reißen sowie die Gewährleistung eines weltweit risikofreien Motor- und Filterbetriebes.

Herausforderungen und Lösungsansätze

Eine wesentliche Herausforderung liegt in der Auslegung der keramischen Monolithe auf hohe Durchströmbarkeit zur Reduzierung von Durchflussverlusten. Wichtigstes Kriterium ist die Verlustarbeit des Motors beim Räumen der Zylinder bedingt durch Gegendruck der Abgasanlage. 100 mbar Gegendruck führen bereits zu einem Kraftstoffmeherverbrauch von ca. 1%.

Weiterhin relevant ist die Reduktion von spezifischem Filtergewicht und Bauvolumen. Ansätze hierfür bieten einerseits die Erhöhung der Zellenzahl pro Querschnittsfläche im Katalysator, um die Kontaktfläche von Abgasen und aktivem Material zu erhöhen sowie andererseits die Verringerung der Wandstärke.

Extrudierte Katalysatoren, die ausschließlich aus aktivem Material bestehen, weisen im Vergleich zu Katalysatoren aus mit Washcoat beschichteten Grundkörpern eine höhere Aktivität bei gleicher Durchtrittsgeschwindigkeit auf.

Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz von Keramiken mit höherer Porosität, was eine höhere Washcoat-Beladung des Substrats oder aber dünnere Zellwandstärken bei gleicher Washcoat-Beladung ermöglicht. Die resultierenden Effekte sind in diesem Fall eine wesentlich verbesserte Performance in niederen Temperaturbereichen bei einer ca. 15%igen Reduktion des Gegendrucks.

Forschungsbedarf

Der wesentliche Trend liegt in der Entwicklung neuer Geometrien für die Grundkörper zur Erhöhung der Designflexibilität. Die Entwicklungen der Keramik im technischen Sinn sind weitgehend zufriedenstellend. Zentrale technische Ziele umfassen:

- » Reduktion von Druckverlust, Bauvolumen und Gewicht
- » Funktionsintegration – mehrere chemische Prozesse in einem Bauteil vereint
- » Neue Lösungen für alternative Geometrien

Fokus Keramik für die mobile Leistungselektronik

Relevanz

In der individuellen Mobilität führen die Forderungen nach immer niedrigeren Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch zu einer zunehmenden Elektrifizierung der Kraft- und Nutzfahrzeuge. Dies betrifft gleichermaßen Nebenaggregate wie die Lenkunterstützung und den Fahrtrieb. Aktuell existiert ein weites Feld unterschiedlicher elektrischer Leistungen. Für kleine Leistungen unterhalb einiger weniger Kilowatt werden Polymerbasierte Leiterplatten eingesetzt.

Oberhalb dieses Leistungsbereichs stoßen diese Lösungen an ihre thermischen Grenzen. Der Werkstoff Keramik kann hier seine guten Eigenschaften voll ausspielen. Spezielle Keramiken haben gute elektrische Isolator-Eigenschaften bei gleichzeitig hervorragender thermischer Leitfähigkeit und Beständigkeit. Diese Materialien sind wichtige Bausteine für den stetig wachsenden Markt der Leistungselektronik.

Darüber hinaus kommen Keramiken in leistungselektronischen Energiespeichern zum Einsatz. In Transformatoren und Speicherdrosseln werden weichmagnetische Materialien verwendet. Kondensatoren nutzen keramische Dielektrika.

Bei der zunehmenden Elektrifizierung der Kraft- und Nutzfahrzeuge sind Keramiken mit guten elektrischen Isolationseigenschaften bei gleichzeitig hervorragender thermischer Leitfähigkeit und Beständigkeit unabdingbar.

Herausforderungen und Lösungsansätze, Forschungsbedarf

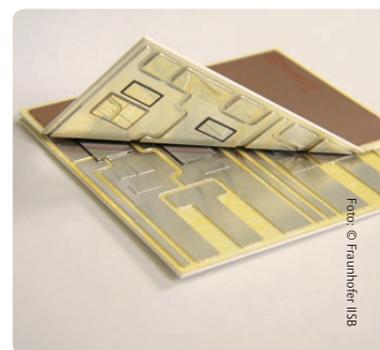
Die Herausforderungen und Lösungsansätze sind in die drei Bereiche Schaltungsträger, weichmagnetische Werkstoffe und Dielektrika für Kondensatoren gegliedert:

Schaltungsträger:

Keramikbasierte Schaltungsträger für die Leistungselektronik müssen für die Fügeprozesse von Halbleitern und Bodenplatten möglichst eben sein. Mechanische Spannungsfreiheit in der Keramik würde die Durchbiegung verringern. Insbesondere für Aufbauten, in denen ein Schaltungsträger-Sandwich (doppelseitige Kühlung) verwendet wird, ist die Durchbiegung äußerst kritisch.

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein wichtiger Parameter. Aktuell existieren Keramiken mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit, aber unzureichenden mechanischen Eigenschaften und einem relativ hohen Preis. Eine Optimierung hin zu moderaten Wärmeleitfähigkeiten und gleichzeitig guter Risszähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit wäre ein Gewinn für die Leistungselektronik. Mischkeramiken können einen Lösungsansatz bei einem weiterhin niedrigem Preis bieten. Funktions- und systemoptimierte Kombinationen von Metallisierung und Keramik sind ein vielversprechender Ansatz. 3-dimensionalisierte und metallisierte Kühlkörper eröffnen ungeahnte Möglichkeiten der technologischen und betriebswirtschaftlichen Optimierung.

Die maximale Durchbruchfeldstärke sowie die Teilentladungsfestigkeit definieren die Isolationseigenschaften des Schaltungsträgers. Gerade für höhere Spannungen tritt dieser Parameter zunehmend in den Vordergrund.



Doppelseitige Kühlung von Leistungshalbleiterbauelementen mit keramischen Schaltungsträgern

Weichmagnetische Werkstoffe (Ferrite):

Ferrite sind Materialien für Transformatoren und Speicherdrosseln. Einer der wichtigsten Parameter ist die Energiedichte. Hebel sind die Permeabilität sowie die maximale magnetische Flussdichte, welche quadratisch statt linear in die Energiedichte eingeht. Verbesserungen hätten direkten Einfluss auf die Baugröße der fertigen Bauelemente. Neben der Energiedichte ist ein weiterer wichtiger Parameter der Magnetisierungsverlust. Durch eine geänderte Materialzusammensetzung bzw. reinere Materialien können diese minimiert werden. Ein weiterer Aspekt ist die Verschiebung des Verlustminimums hin zu höheren Temperaturen. Eine höhere Temperatur erlaubt kostengünstigere Kühlungskonzepte.

Dielektrische Werkstoffe für Kondensatoren:

Wie bei den weichmagnetischen Werkstoffen ist die Energiedichte der wichtigste Parameter. Die Permittivität geht linear in die Energiedichte ein, die maximale Feldstärke quadratisch. Der Fokus sollte daher auf der Erhöhung der Feldstärke liegen. Aktuell sind die angewendeten Feldstärken in Keramik Kondensatoren um eine Größenordnung unterhalb der möglichen Materialeigenschaften angesiedelt. Verringerung oder Vermeidung der Poren wäre ein Lösungsansatz. Des Weiteren leiden Keramik Kondensatoren nach dem Stand der Technik an einer sehr großen Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur und der angelegten Feldstärke. Im Betrieb werden die Nennwerte selten angewendet, um einen genügend großen Sicherheitsabstand einzuhalten. Neue Material-Formulierungen mit weniger ausgeprägten Abhängigkeiten wären hier ein Ansatz.

Elektromobilität – Fokus Batterietechnik

Relevanz

In Anbetracht des erfolgreichen Ausbaus der Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen werden deutliche Fortschritte in der Batterietechnologie als der zentrale Erfolgsfaktor für die Entwicklung in einem Markt gesehen, dem mit einem Wachstum von ca. 0,37 % im vergangenen Jahr auf ca. 2,91 % im Jahr 2020 signifikante Entwicklungspotenziale zugeschrieben werden.

Der größte Hebel für einen erfolgreichen Ausbau der Elektromobilität wird in der Erhöhung der Energiedichte von Batterien gesehen, da dies der entscheidende Schlüssel ist, größere Reichweiten zu realisieren. Zwischen dem aktuellen Stand der Technik (130 bis 160 Wh/kg) und der gegenwärtig verfolgten Zielstellung von 300 bis 600 Wh/kg besteht noch eine erhebliche Diskrepanz.

Entsprechend fokussiert die Zielstellung der aktuellen Forschungsschwerpunkte auf die Erhöhung der Energiedichte des Elektrodenmaterials, wobei in Anbetracht der deutlichen Mehrkosten von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen, die zum größten Teil auf die Batterie entfallen, der Kostendruck ebenfalls eine erhebliche Rolle für einen erfolgreichen Ausbau der Elektromobilität spielt.

Mit Blick auf die Qualität ist festzuhalten, dass an E-Antriebe höhere Lebensdaueranforderungen gestellt werden als an konventionelle Antriebe und auch sicherheitsrelevante Aspekte im Versagensfall der Batterie eine bedeutende Rolle spielen.



Das Elektroauto – Vision von energieeffizienter Mobilität

Herausforderungen und Lösungsansätze

Das Themenfeld der Batterietechnik befasst sich mit dem Einsatz keramischer Komponenten im Inneren der Batterie. Explizit werden Ansätze zur Verlängerung der Lebensdauer von Elektrolyten und Elektroden sowie sicherheitsrelevante Aspekte thematisiert. Bezüglich der Lebensdauererhöhung wird die Notwendigkeit hervorgehoben, werkstoffseitig neue Ansätze für Schutzschichten zu entwickeln, die die Materialauflösung durch Materialwanderung von Anode zu Kathode oder im Falle von Lithium-Schwefelbatterien die Nebenreaktionen und Morphologieänderung der Metallanode beherrschen.

Für einen sicheren und stabilen Batteriebetrieb über die Lebensdauer ist eine optimale Kombination aus keramischen Separator- und Schutzschichten für das Multimaterialsystem Batterie unverzichtbar.

Die effektive Trennung der Elektroden spielt jedoch auch aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten eine entscheidende Rolle und hat im Rahmen der industriellen Fertigung von Batterien erhebliche Anforderungen an deren Präzision. Die Kenntnisse der aktiven Batteriematerialien sind bereits weit fortgeschritten. Um jedoch über die Lebensdauer einen sicheren und stabilen Batteriebetrieb gewährleisten zu können, ist es notwendig, das ingenieurwissenschaftliche Know-how zur Auslegung, Konstruktion und letztlich stabilen Fertigung von Batterien zu fördern und auszubauen. Die Herausforderung in diesem Punkt besteht darin, die Kombination aus keramischen Materialien für Separator- sowie Schutzschichten und den Beschichtungsprozess der einzelnen Zellen in der Serienfertigung des Multimaterialsystems Batterie zu optimieren. Im Wesentlichen gilt es, die Präzision des Beschichtungsprozesses bei gleichzeitiger Erhöhung der Prozesssicherheit zu verbessern.

Weiterentwicklungen in diesem Bereich sind erforderlich, um die Zuverlässigkeit von Batterien zu erhöhen und sind somit neben der Erarbeitung neuer Lösungen zur Isolation der Batterien – wie im Themenfeld ‚Thermomanagement im Antriebs- und Abgasstrang‘ angesprochen – eine Notwendigkeit für eine erfolgreiche Weiterentwicklung im Bereich der E-Mobilität.

Forschungsbedarf

Anforderungen an neue Werkstoffe

Entwicklung neuer Schutz- und Separatorschichten zur Verringerung der Materialauflösung von Elektroden und Elektrolyt, sowie zum Schutz der Metallanode vor Nebenreaktionen und Morphologieänderung (bei entsprechender Materialkombination wie z.B. in Lithium-Schwefel-Batterien).

Anforderungen an Fertigungsprozesse

Optimierung der Beschichtungsprozesse der Zellen hinsichtlich Präzision und Prozesssicherheit. (Wichtig ist die Berücksichtigung des Zusammenspiels von Material und Prozess.)



Aufwickelvorrichtung für Batteriefolien

IV

Hochleistungskeramiken für Elektrotechnik und Optik



Fokus Passive Elektrische Bauelemente

Relevanz

Elektrische Bauelemente auf der Basis von Oxidkeramik sind aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Sie finden ihre Anwendung als Schutzbauelemente, Aktuatoren, Sensoren etc. in Anwendungsfeldern, wie zum Beispiel in der Elektronik, der Informations- und Kommunikationstechnologie sowie der Energietechnik.

Die nachfolgende Aufzählung zeigt die große Vielfalt an keramischen Bauelementen auf:

- » Keramikkondensatoren
- » Mikrowellenkeramik
- » PTC Thermistoren
- » NTC Thermistoren
- » Varistoren
- » Vielschicht-Varistoren
- » Piezoaktuatoren
- » Resistoren
- » Ferrite etc.

Getrieben durch immer höhere Anforderungen an Leistungsdichte, Miniaturisierung und enge Toleranzen hat sich eine hoch spezialisierte Industrie etabliert, die diese Bauelemente weiterentwickelt und in großen Stückzahlen fertigt.

Die Vielfalt elektrischer Bauelemente basiert auf der profunden Kenntnis von funktionskeramischen Materialien, ihren Eigenschaften und geeigneten Herstelltechnologien.

Materialien auf der Basis von Perovskiten, Spinellen und verschiedenen anderen Oxidmischungen mit Korngrößen von einigen 10 nm bis zu einigen μm werden auf der klassischen Mixed-Oxide-Route oder auf chemischem Weg im Tonnenmaßstab produziert und mit verschiedenen Formgebungsverfahren, wie zum Beispiel über Presstechnologie, Folientechnologie oder Extrusion zu Grünteilen weiter verarbeitet. Diese werden thermisch entbindert und anschließend gesintert. Bei Verwendung von kostengünstigeren unedlen Elektrodenmaterialien wie Nickel oder Kupfer werden diese thermischen Prozesse unter genauester Kontrolle der Atmosphäre durchgeführt. Alternativ dazu gewinnen Dünnschichtverfahren, u.a. als Metallisierungsverfahren zunehmend Anwendungsfelder. Geht man mit den o.g. Aspekten noch einen Schritt weiter, so werden die Grenzen zwischen den sogenannten aktiven und passiven Bauelementen eher fließend. Im Zusammenschluss von Materialexpertise und den resultierenden physikalischen Kennwerten von passiven Bauelementen und unter Einbeziehung von hochintegrierten Logikschaltungen (Halbleiter) wird es vermehrt integrierte und intelligente passive Bauelemente geben. Über die Ausgestaltung und Integrationstiefe muss im Hinblick auf künftige hochintegrierte Produkte nachgedacht werden. Hierzu müssen neue Messmethoden und Herstellverfahren entwickelt werden. Die Integration erfordert ebenfalls den produktionstechnischen Schulterschluss von Halbleiterherstellung und den mannigfaltigen Herstellungsmöglichkeiten von passiven Bauelementen. Eine derart gestaltete hybride Fertigung wird den o.g. Anforderungen gerecht und ist eine Herausforderung für das dezidierte Know-how der beteiligten Branchen.

Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

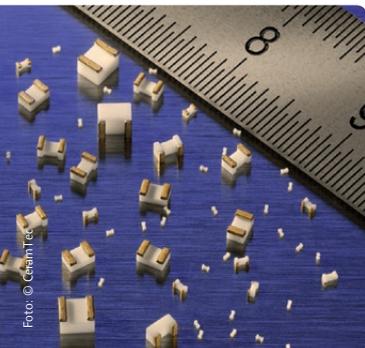
Um im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben, ergeben sich aus dem Trend nach höherer Leistungsdichte, weiterer Miniaturisierung und Kostenreduktion Herausforderungen an die Keramikindustrie, die nur im Verbund mit externen/öffentlichen Forschungseinrichtungen zu bewältigen sind.

Die Grenzen zwischen den sogenannten aktiven hochintegrierten Halbleiterschaltungen und passiven Bauelementen werden zukünftig eher fließend sein.

Wesentliche Aspekte dabei sind:

- » Erhöhung der Leistungsdichte
 - » Erhöhte Performance bei gleicher Bauform
 - » Miniaturisierung bei gleichbleibender Performance
 - » Optimierung der thermomechanischen Eigenschaften
 - » Optimierung der Wärmeleitfähigkeit
- » Ersatz von Rohstoffen
 - » aus Umweltschutz-Gründen z.B.: Pb-freie Materialien oder Minimierung der notwendigen Mengen an unverzichtbaren Pb-haltigen Materialien, z.B. PZT, da ein Ersatz gegenwärtig nicht erkennbar ist
 - » aus Kosten- und Versorgungsgründen z.B.: Selten-Erd-Oxide
- » Prozessoptimierung und -entwicklung
 - » Erhöhung von Ausbeute und Qualität
 - » Atmosphärensteuerung für Base-Metall-Elektroden und zur Steuerung der Keramikeigenschaften
 - » Neue Herstellprozesse für miniaturisierte Bauformen
- » Ausweitung der zulässigen Einsatzbedingungen in Richtung höherer Temperaturen
 - » Tuning der Temperaturabhängigkeit der primären Bauteileigenschaften
 - » Langzeitstabilität bei erhöhten Temperaturen und verschiedenen Umgebungsbedingungen
- » Prozess- und Bauteilsimulationen
 - » Simulation von Sintervorgängen (Temperaturverteilung und Strömungsverhältnisse in Sinteröfen)
 - » Simulation von polykristallinen Materialien auf der Ebene von Einzelkorn-grenzen bzw. auf atomarer Ebene
 - » Simulation von stark nichtlinearen Materialeigenschaften mit Hilfe von Multi-Physik-Methoden
- » Minimierung von Defekten auf meso-, mikro- und submikroskopischer Ebene
 - » Ausdehnung der Reinraumtechnologie auch auf vorgelagerte Prozesse, wie Rohstoff- und Pulverherstellung

IV



Keramische Spulenkörper

Forschungsbedarf

Die für die Zukunft bestehenden Herausforderungen bedingen einen entsprechenden Bedarf an Grundlagenforschung und angewandter Forschung. Dieser Bedarf umfasst die Bereiche Materialsynthese, Simulation, Design und Fertigungstechnologie.

- » Zusammenhang zwischen dem Mikrogefüge und makroskopischen, elektrischen Eigenschaften
- » Probenpräparation im Mikromaßstab
- » Komplementäre Messmethoden mit hoher Ortsauflösung auf dem Level von identischen Einzelkörnern und Einzelkorn Grenzen, z.B. Zusammensetzung, Kristallorientierung, elektrische Eigenschaften (linear oder nicht linear) in Abhängigkeit von z.B. Temperatur, mechanischen Spannungen etc.
- » Bottom-Up-Simulation (Netzwerkmodellierungen) der elektrischen und mechanischen Eigenschaften von polykristallinen Keramikgefügen auf Basis der Eigenschaftsverteilungen einzelner Körner bzw. Korngrenzen
- » High-Throughput-Methoden für Materialpräparation und für die Analyse von chemischen, physikalischen und elektrische Materialeigenschaften
- » Kombination klassischer Verfahren zur Herstellung von Keramikpulvern mit chemischen Verfahren zur Modifikation von Pulveroberflächen (neue Korngreneigenschaften; Kontrolle von Kornwachstum und Sinterverdichtung)
- » Massenfertigungstaugliche Texturierungsverfahren für Keramiken, um orientierungsabhängige Eigenschaften gezielt in neue Bauteileigenschaften zu übertragen
- » Wechselwirkungen zwischen Oxidkeramiken, Elektrodenmaterial, Sintertemperatur und Atmosphäre (Co-Firing unterschiedlicher funktioneller Materialien)
- » Alternative Formgebungsverfahren für aktive Schichten im Bereich von einigen nm bis zu einigen μm
- » Kinetische Modellierung von Sintervorgängen unter Einbeziehung von Atmosphäreneinflüssen
- » Erarbeitung von Design Rules für die Integration zusätzlicher Funktionalitäten

Vision einer künftigen Keramikfertigung

Die zukünftige Fertigung von funktionskeramischen Bauelementen wird einer höheren Komplexität bei den Keramikwerkstoffen und Verfahrenstechnologien begegnen.

- » **Pulversynthese**
Kombination von klassischer Mixed-Oxide-Technologie mit chemischer Modifikation/Dotierung der Pulver (e.g. Aufbau von Schalenstrukturen auf μ - und nano-Pulvern, d.h. selektive Abfolge von Dotierstoffschichten) zur kostengünstigen Herstellung von ‚strukturierten‘ Keramikpulvern und Seedkristallen zur Texturierung.
- » **Bauteildesign**
Ersatz von heterogener, stochastischer Bulk-Keramik durch Keramiken, die Einzelkorn Grenzen bzw. hoch orientierte, parallel oder in Serie geschaltete Einzelkorn Grenzen nutzen, um ihre Funktionalität zu erhalten.
Entwicklung und Standardisierung geeigneter Co-Firing- oder Post-Firing-Technologien zur Integration verschiedener Funktionalitäten in einem Bauelement; Realisierung „beliebiger“ Materialkombinationen durch Dünnschichttechniken.

» **Miniaturisierung**

Erhöhung der Leistungsdichte keramischer Materialien zur weiteren Miniaturisierung elektronischer Bauelemente mit Kantenlängen von einigen 100 µm als Standard

» **Neue Anwendungsfelder**

Bauteile mit Einsatztemperaturen jenseits von 150-250°C für neue Anwendungen in KFZ- und Leistungselektronik

» **Kompositwerkstoffe aus Keramik, Metall und Polymeren**

für Bauteile mit neuen Eigenschaften

Fokus Lichttechnik

Keramische Leuchtstoffe

Relevanz und Stand der Technik

Der Einsatz von keramischen Leuchtstoffen in LEDs und Lasern bietet den enormen Vorteil, eine höhere Effizienz bei hohem Lichtstrom und hohen Betriebstemperaturen zu erreichen sowie die Alterung zu reduzieren.

Neue Leuchtstoffe sind ein wesentlicher Teil in der modernen Lichttechnologie mittels Licht-emittierender LED-Dioden.

Diese Leuchtstoffe werden zur Konvertierung der blauen Strahlung von InGaN-basierten LED-Lichtquellen in sichtbares Licht unterschiedlicher Wellenlänge genutzt und sind heute in nahezu jeder weißen LED eingesetzt. Während in den Standard-LEDs ausschließlich Leuchtstoffe in Pulverform verwendet werden, kommen in Hochleistungs-LEDs oder Lasern vereinzelt auch schon massive Leuchtstoff-Keramikkörper zum Einsatz, deren wesentlicher Vorteil es ist, sehr hohe Lichtströme zu ermöglichen. Mit dem rasanten Effizienz- und Helligkeitsanstieg blauer LEDs in den letzten zehn Jahren haben sich auch die Anforderungen an die Leuchtstoffe für die Konversion in weißes Licht stetig erhöht.

Die am häufigsten eingesetzten gelb emittierenden Leuchtstoffe zur Erzeugung von kaltweißem Licht sind Cer-dotierte Yttrium-Aluminium-Granate (YAG:Ce³⁺). Um warmweißes Licht zu erzeugen, werden zusätzlich rote Eu²⁺-dotierte nitridische Emitter verwendet (z.B. M₂Si₅N₈; MAISiN₃ mit M = Ca, Sr, Ba). Diese Leuchtstoffe sind für LED-Lichtquellen essentiell, um bestimmte Farbtemperaturen (CCT) oder Farbwiedergabeeigenschaften (CRI) zu erreichen.

Der pulverförmige Leuchtstoff wird in der Regel in organische Matrixmaterialien, wie z.B. Silikone oder seltene Epoxide, eingebracht und als Konversionsschicht auf der LED positioniert. Organische Matrices weisen allerdings niedrige Brechungsindizes auf, erhöhen die optische Streuung und reduzieren somit die Effizienz der LED. Sie



LED-Lichtquellen:
Sichtbarkeit und Sicherheit

führen bei Anwendungen mit hohen Lichtströmen durch geringe Wärmeleitung und chemische Alterung zur Effizienzreduzierung und Farbortverschiebung.

Diese Nachteile überwinden massive keramische Leuchtstoffkörper, die aufgrund der besseren Wärmeableitung das thermische Löschen des Leuchtstoffs mindern und damit eine höhere Bestromung einzelner LED-Chips ermöglichen. Die Keramikkonverter sind heute Gegenstand intensiver Forschung, haben aber in speziellen Applikationen auch schon den Eintritt in den Markt geschafft.

Von Interesse ist der Einsatz keramischer Leuchtstoff-LEDs insbesondere in Applikationen, die hohe Lichtströme und eine möglichst kleine Lichtaustrittsfläche erfordern, z.B. in Automobilfrontscheinwerfern, in Bühnenscheinwerfern, in professionellen Spotlichtquellen oder in Projektionslichtquellen. Neben weißen LEDs sind Keramikkonverter-LEDs auch für gelbe, grüne und rote LEDs relevant, die die blaue Strahlung der Pumplichtquelle vollständig konvertieren. Grüne und rote Konversions-LEDs sind beispielsweise für Projektionsanwendungen von Interesse. Die kommerziell erhältlichen LEDs mit Keramik-Konverter sind aber heute beschränkt auf Einstoff-Systeme, da die Verwendung unterschiedlicher Leuchtstoffe in einem Keramikkörper bisher nicht möglich ist. Für Hochleistungsanwendungen werden auch blaue Laserdioden in Verbindung mit Leuchtstoffen als weiße Lichtquellen erforscht. Großer Nachteil der Keramikkonverter ist ihre aufwendige Herstellung, die - volumenabhängig - den Preis der LEDs nach oben treibt.

Für die keramischen Leuchtstoffkörper werden die etablierten Methoden wie Pressen, Tape- oder Slipcasting sowie Spritzgusstechnik zur Herstellung der Grünkörper mit anschließendem Sintern des Grünkörpers zum Keramikkörper evaluiert. Im Gegensatz zu den transparenten Optokeramiken ist die Restporosität im Keramikkonverter für die LEDs ein Schlüsselfaktor, der den Farbort, die Helligkeit und Effizienz sowie die winkelabhängige Farbverschiebung beeinflusst und somit genau kontrolliert werden muss. Bei kostengünstigen Herstellverfahren könnte so auch der entscheidende Wert Lumen/EUR erhöht werden, da die nutzbare Lichtleistung steigt.

Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Um das Potenzial der Keramikkonverter voll nutzen zu können, ist es einerseits wichtig, die Technologie einem breiteren Spektrum verschiedener Leuchtstoffe zugänglich zu machen, und andererseits kostengünstigere Herstellverfahren zu entwickeln.

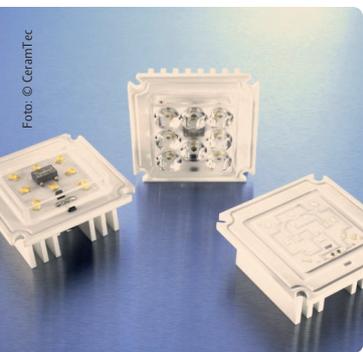
Für die Keramikentwicklung oxidischer Systeme ist die Prozesstechnologie deutlich weniger aufwendig als für nichtoxidische, nitridische Leuchtstoffe. Als Basis gezielter Entwicklungen ist ein besseres Verständnis zum Zusammenhang von Leuchtstoffeigenschaften, den Prozessparametern und der Mikrostruktur der Keramik wichtig. Gleichzeitig müssen auch Methoden entwickelt werden, die sehr kleinen Leuchtstoffkörper, z.B. 1 mm x 1 mm x 50 µm Plättchen, ohne Eigenschaftsschädigung präzise herzustellen und deren Handling zuverlässig zu gewährleisten.

In Mehrkomponenten-Keramikkonvertern besteht die Herausforderung darin, unterschiedliche Keramikkörper so anzuordnen und miteinander zu verbinden (z.B. Co-Sintern), dass die ursprünglichen Eigenschaften der Einzelkomponenten ungestört erhalten bleiben, was insbesondere beim Co-Sintern eine große Herausforderung darstellt.

Forschungsbedarf

Der längerfristige Forschungsbedarf ergibt sich einerseits aus den genannten Herausforderungen und andererseits aus der steten Forderung nach Verbesserung von Leistungsfähigkeit und Prozesstechnologie solcher LED-Leuchtstoffe:

- » massenmarktaugliche Herstellungsverfahren der Leuchtstoffkeramiken, auch durch neuere Sinterverfahren wie Spark Plasma Sintering oder Niedrig-Temperatur-Verfahren (z.B. Plasma-Abscheidung)
- » theoretisches Verständnis zu Zusammenhang der Leuchtstoffeigenschaften, Prozessparametern und Mikrostruktur der Keramik, auch durch Einsatz von Simulationen
- » Prozesstechnologien für bisher nicht zugängliche Leuchtstoffverbindungen
- » neue Ansätze zur Herstellung und Verarbeitung von zwei- und dreikomponentigen Leuchtstoffsystemen
- » 3-D Formgebung der Keramikkörper für bestimmte Anordnungen von Lichtquelle zu Leuchtstoffkeramik
- » Innovative Verbindungstechniken für Keramikkörper und LED-Chips sowie optische Zusatzkomponenten



Keramische Kühlkörper für LED-Lichtquellen

Keramiksubstrate für Lichttechnik

Der technische Wandel von der konventionellen zur LED-basierten Lichttechnik erfordert auch auf der Substrat- und Gehäuseebene wettbewerbsfähige Lösungen.

Um die LEDs thermisch sowie elektrisch anzubinden, werden diese auf Substrate aufgebracht. Unterschiedliche Substratmaterialien, von organischen bis hin zu anorganischen Materialien, kommen hierbei zum Einsatz.

Während sich organische Materialien durch geringere Kosten und einfachere Verarbeitung auszeichnen, ermöglichen Keramiken höhere Wärmeleitfähigkeit und hohe elektrische Isolationsfähigkeit.

Keramiken bieten gegenüber organischen Materialien technische Vorteile aufgrund ihrer höheren Wärmeleitfähigkeit und hohen elektrischen Isolationsfähigkeit.

Stand der Technik und Anwendung in der Lichttechnologie

Die am häufigsten eingesetzten Keramiksubstrate bestehen aus Aluminiumoxid und Aluminiumnitrid. Die Wärmeleitfähigkeit von Aluminiumoxid liegt bei ~ 30 W/mK und von Aluminiumnitrid bei bis zu 230 W/mK. Im Vergleich hierzu erreichen typische Leiterplatten aus einem FR4 Verbund nur ~ 1 W/mK. Jedoch sind die Kosten von FR4 um einen Faktor von ~ 8 ^[11] (verglichen zu Aluminiumoxid) geringer.

Hochleistungs-LEDs, wie beispielsweise die OSRAM OSOLON Square, verfügen über ein hoch reflektives Keramiksubstrat mit hoher Wärmeleitfähigkeit zur Wärmespreizung und Wärmeabfuhr. Analoge Anordnungen werden auch für sogenannte Chip-on-Board-Lichtquellen verwendet, die aus mehreren LED-Chips aufgebaut sind.

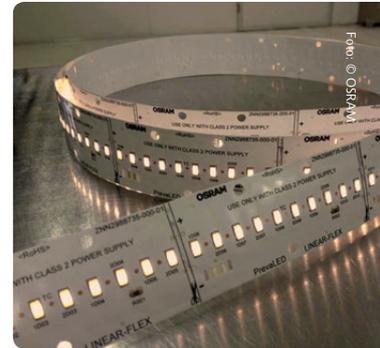
Einen weiteren technischen Lösungsansatz bietet die direkte Anbindung an metallisierte Keramik (CeramCool®). Keramische Kühlkörper stellen generell eine effektive Kombination von Substrat und Kühlkörper zur sicheren Entwärmung thermisch sensibler Komponenten und Schaltungen dar, wie bei LED-Anwendungen erforderlich.

Herausforderung und Forschungsbedarf

Aluminiumoxid oder Aluminiumnitrid sind aufgrund ihrer hohen Wärmeleitung, elektrischer Isolationseigenschaft, optischer Reflektivität und des thermischen Ausdehnungskoeffizienten bestens für den Einsatz als LED-Substrat geeignet. Die größte Herausforderung liegt in der Reduktion der hohen Kosten sowie in der Optimierung der Systemkosten. Um die Kosten zu reduzieren, müssen neue Prozesstechnologien und auch Materialien erforscht werden.

In der Materialforschung soll durch Zugabe von Additiven (z.B. Zirkonoxid) die Bruchzähigkeit der Substrate weiter erhöht werden. Durch dünnere Substrate könnten dann der Materialverbrauch und die damit verbundenen Kosten gesenkt sowie die Wärmeleitung erhöht werden.

Für die Prozesstechnik müssen vor allem billige und massenmarktaugliche Herstellungsverfahren entwickelt werden, z.B. durch Hochskalierung der Substratfolienbreite von derzeit 60 bis 100 cm auf ein Vielfaches



Flexband mit Weißlicht-LEDs

V

Hochleistungskeramiken für Life Sciences



Relevanz

In den Lebenswissenschaften, speziell im Bereich der medizinischen Implantologie und Prothetik spielen nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe eine bedeutende Rolle. Die wichtigsten Werkstoffe sind in diesem Anwendungsfeld Strukturkeramiken, Calciumphosphat-basierte Biowerkstoffe sowie sogenannte Biogläser.

Der Gelenkersatz in Deutschland ist ein medizintechnologischer Beitrag zur Erhaltung von Mobilität und Lebensqualität im Alter.

Über 9 Millionen Menschen leiden in Deutschland unter ständigen Schmerzen durch Arthrose und Arthritis, was zu Arbeitsunfähigkeit und unerwünschter Frühverrentung führt. Der Gelenkersatz ermöglicht eine kausale Behandlung schwerer Gelenksbeschwerden. Die Implantation einer Gelenkendoprothese ist einer der erfolgreichsten chirurgischen Eingriffe. Jährlich erhalten rund 400.000 Deutsche ein künstliches Gelenk. Im Jahr 2012 wurden in Deutschland rund 210.000 künstliche Hüftgelenke sowie 160.000 künstliche Kniegelenke implantiert.

Seit rund fünf Jahrzehnten arbeiten Hochschulen, Kliniken und die Industrie gemeinsam an der Weiterentwicklung und Verbesserung des künstlichen Gelenkersatzes. Die operativen Verfahren sind in diesem Zeitraum immer ausgefeilter, die Implantatsysteme technisch immer besser und durch den Einsatz der Keramik hinsichtlich Verschleiß kontinuierlich optimiert worden.

Bedingt durch höhere Lebenserwartung und die Aktivität der Patienten steigen jedoch die Anforderungen an die Materialien für Implantate.



BILOX Hüftgelenkskomponenten
- Kugelkopf und Pfanneninsert für
Hüftprothesensysteme

Fokus Strukturkeramiken, Calciumphosphatwerkstoffe und Biogläser

Relevanz und Stand der Technik

Aus der Gruppe der Strukturkeramiken werden die Oxidkeramiken seit mehr als 40 Jahren erfolgreich in der Endoprothetik (Knie- und Hüft-TEP) eingesetzt. Kamen anfänglich vor allem reine Al_2O_3 -Keramiken zum Einsatz, wurden diese von den inzwischen eingeführten Misch-Oxid- oder Dispersionskeramiken basierend auf Al_2O_3 und ZrO_2 größtenteils verdrängt. Die Abrasionsbeständigkeit von Oxidkeramiken in Verbindung mit dem bioinerten Verhalten dieser Werkstoffe hat das klinische Problem der abriebinduzierten aseptischen Lockerung weitgehend gelöst.

Im dentalen Bereich kommt unter den Strukturkeramiken vor allem Zirkonoxid (Y-TZP) als Zahnkronen- und Zahnbrücken-Kernmaterial zum Einsatz. Erste Langzeitstudien bestätigen die Zuverlässigkeit dieser polymorphen Strukturkeramik in der Dentalprothetik. Durch Farbchangierungen ist es mittlerweile möglich, ‚vollanatomische‘ Zirkonoxid-Kronen und -Brücken so an die Farbnuancen des Restgebisses anzupassen, dass auf eine nachträgliche glaskeramische Verblendung verzichtet werden kann. Dies hat jedoch zur Folge, dass eine monolithische Zirkonoxidrestauration aufgrund ihrer hohen Verschleißbeständigkeit den natürlichen Antagonisten im Gegenkiefer mitunter stark abradert.



Femur-Komponente für ein keramisches Kniegelenk

Die Mineralphase des menschlichen Knochens besteht überwiegend aus Calciumphosphaten (CaP). Daher spielen die synthetisch erzeugten CaP-Werkstoffe, vor allem Hydroxylapatit und Tricalciumphosphat für den Knochenersatz eine wichtige Rolle. Insbesondere Tricalciumphosphat ist auch in gesinterter Form im biologischen Milieu degradierbar. Dies wird genutzt, um Implantate für die sogenannte ‚Regenerative Therapie‘ zu fertigen. Strategie dabei ist, dass die Degradation des Knochenersatzimplantates und die Neubildung vitalen Knochengewebes zeitlich parallel Hand in Hand ablaufen. Zum Aufbau dreidimensionaler Strukturen aus CaP-Werkstoffen werden moderne generative Fertigungsverfahren bereits intensiv genutzt. Auf der Basis von klinischen Computertomografie-Daten können so geometrisch passgenaue Knochenersatz-Scaffolds hergestellt werden.

Neben Struktur- und Calciumphosphatkeramiken finden sogenannte Biogläser seit mehreren Jahrzehnten Anwendung im Bereich Life Sciences. Diese Gläser aus dem System $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO-P}_2\text{O}_5$ sind biodegradierbar und begünstigen bei entsprechender Zusammensetzung den Aufbau und die Neubildung von Weichgewebe oder Knochenmaterial.

Bei der Neubildung von Knochengewebe beruht dies einerseits auf der schnellen Bildung einer Apatitschicht auf der Bioglasoberfläche, was für die Bildung von Knochengewebe günstig ist, andererseits auf der kontrollierten Abgabe und Lösung der ionischen Bestandteile des Bioglases. Letzteres wird primär durch die Abgabe von Silicium und Calcium Ionen gesteuert, wodurch die osteoblastären Vorläuferzellen zur osteogenen Differenzierung angeregt und Osteocyten gebildet werden. Die extrazelluläre Matrix des Knochengewebes wird synthetisiert und mineralisiert und somit aktives Knochengewebe aufgebaut.

Herausforderungen, Lösungsansätze und Forschungsbedarf

Generell stehen den Vorteilen der Keramik immer deren meist höhere Herstellkosten und das Risiko einer möglichen Fraktur gegenüber.

Für lasttragende Keramikkomponenten im Bereich der Gelenkendoprothetik konnten die in den Anfangsjahren hohen Frakturnraten der Hüftköpfe inzwischen um mehrere Größenordnungen reduziert werden. Für keramische Kugelhüftköpfe aus Misch-Oxidkeramik wird das Problem der Fraktur mittlerweile sogar als gelöst betrachtet. Wesentlichen Anteil daran haben die entwickelten Keramikwerkstoffe – zusätzlich zu erfolgten Maßnahmen wie Schulung der Operateure bzgl. Montage keramischer Komponenten.

Die Frakturnraten keramischer Pfanneneinsätze können jedoch noch nicht zufriedenstellen. Wesentliche Ursachen der auftretenden Brüche liegen in der intraoperativen Handhabung und Montage der Komponenten. Treten dabei Fehler auf, können Punktbelastungen oder generell erhöhte Spannungen eine Fraktur auslösen. Deshalb unternehmen die Hersteller weiterhin Anstrengungen, um die Bruchsicherheit der Komponenten durch weitere Verbesserungen der Werkstoffe, Produktgestalt, Instrumentarium sowie Schulung der Operateure zu erhöhen. Ein anderes werkstoffbezogenes Problem betrifft vor allem Keramik-Keramik-Gleitpaarungen. Beim Auftreten von punktuell hohen Flächenpressungen im Bereich der Gleitflächen durch sogenannte Subluxationen oder Mikroseparationen können diese zu Oberflächenaufrauungen führen, die als Einflussfaktor beim Auftreten unerwünschter Geräusche im künstlichen Gelenk gelten oder zusätzlich Rissbildung und sogenanntes Chipping verursachen. Intelligentes Produktdesign sowie entsprechende Instrumente können helfen, Subluxationen und Mikroseparationen zu vermeiden.

Materialseitig könnten keramische Komponenten in Zukunft z.B. durch maßgeschneiderte Verbundwerkstoffkonzepte noch sicherer für den klinischen Einsatz gestaltet werden.

Gerade in Bezug auf eine verbesserte Langzeitverlässigkeit (Steigerung des unterkritischen Rissparameters n) stellen auch hier die Misch-Oxidkeramiken interessante Weiterentwicklungen dar.

Im Bereich der Dentalprothetik besteht der Forschungsbedarf für die kommenden Jahre in Werkstoffoptimierungen, um der derzeit verstärkten Nachfrage nach vollanatomischen Dentalkeramik-Restaurationen mit optimierten Werkstoffen gerecht zu werden. Beispielsweise müssen Möglichkeiten für die Vermeidung der bereits beschriebenen Abrasion des natürlichen Antagonisten beim Einsatz nicht verblendeter vollkeramischer Zirkonoxid-Kronen und –Brücken gefunden werden.

Das grundsätzliche Problem der unterkritischen Rissausbreitung von dentalen Zirkonoxid-Restaurationen stellt sich aktuell durch die Nutzung glaskeramischer Verblendungen weniger gravierend dar, da die polymorphe Keramik nicht in direktem Kontakt zum Speichel steht. Bei den vollanatomischen Zirkonoxidrestaurationen wird das unterkritische Rissausbreitungsverhalten durch den direkten Wasserkontakt jedoch forciert. Auch hier könnten keramische Weiterentwicklungen maßgeschneiderter Dispersionskeramiken in Zukunft hilfreich sein, um die mechanische Langzeitverlässigkeit solcher Restaurationen zu verbessern.

Nichtoxid-Hochleistungskeramiken stehen bislang nicht im Fokus von Anwendungen im Bereich der Life Sciences. Durch ihre Phasenstabilität und ihre teils extreme mechanische Beanspruchbarkeit sind sie für einen möglichen Einsatz als Komponenten für medizinische Implantate jedoch von besonderem Interesse. Es konnte zudem in mehreren wissenschaftlichen Studien bereits gezeigt werden, dass insbesondere Siliziumnitrid je nach Modifikation und Herstellungsprozess zytokompatibles Verhalten aufweist. Daher besitzen nichtoxidische Hochleistungskeramiken für den medizinischen Bereich ein großes Potenzial und könnten zukünftig bei bestimmten Applikationen zu einer verbesserten klinischen Zuverlässigkeit beitragen.

Bei Scaffolds aus Calciumphosphaten haben die Gestaltung des Porendesigns und die Porengröße großen Einfluss auf das Knochen-Einwachsverhalten und deren Umbaucharakteristik. Hier sind auch zukünftig noch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gefragt, um zum einen prozesstechnisch das gewünschte Porendesign reproduzierbar herstellen zu können. Zum anderen muss noch weiter erforscht werden, wie sich verschiedene CaP-Zusammensetzungen in Kombination mit verschiedenen Porendesigns auf die zelluläre Antwort in vivo im Detail auswirken.

Da der menschliche Knochen – als klassisches Beispiel für einen natürlichen Verbundwerkstoff - aus anorganischen (CaP) und organischen Anteilen (Weichgewebezellen, Kollagen, u.a.) besteht, wird dies auch bei der Knochenersatzforschung berücksichtigt. So zielt die zukünftige Entwicklung auf intelligente organisch-anorganische Verbundwerkstoffe ab. Hierbei gibt es sowohl biochemische Herausforderungen als auch anspruchsvolle Entwicklungsaufgaben hinsichtlich der Fertigung und Funktionalisierung der neuartigen biologischen Ersatzwerkstoffe.

Neben den steigenden Anforderungen an die Eigenschaften der keramischen Materialien für die Implantologie spielt zunehmend der Kostenaspekt zur Herstellung der



Blanks für die Herstellung von dentalprothetischen Kronen und Brücken

keramischen Implantatkomponenten eine Rolle. Einem zunehmenden Kostendruck stehen steigende Aufwendungen der Hersteller für Produktzulassung und Dokumentation entgegen. An dieser Stelle wird zukünftig die Nachfrage nach effizienten Herstelltechnologien keramischer Bauteile nach ‚near netshape‘-Verfahren für die Formgebung und nach preiswerten kostengünstigen Rohstoffen wachsen.

Als langfristig potentiell problematisch wird die Rohstoffsituation zur Verfügbarkeit der Seltenen Erden eingeschätzt. Yttrium und Cer spielen beispielsweise zur Phasenstabilisierung des Zirkoniumoxids eine wichtige Rolle. China hat in den letzten drei Jahren Exportbeschränkungen eingeführt, wodurch die Verfügbarkeit dieser Rohstoffe weltweit gedrosselt wurde. Aufgrund dieser Monopolstellung Chinas ist es aktuell schwer abschätzbar, inwieweit die Verfügbarkeit dieser Dotierungselemente langfristig stabil und abgesichert ist. Deshalb muss nach Möglichkeiten gesucht werden, diese Seltenen Erden durch kommerziell langfristig verfügbare Elemente zu substituieren.

Fokus Strukturierung / Funktionalisierung keramischer Implantatoberflächen

Relevanz und Stand der Technik

Seit einigen Jahren werden oxidische Hochleistungskeramiken erneut in Anwendungen eingesetzt, bei denen die Keramik eine direkte Verbindung mit dem Knochen eingehen soll, z.B. Zirkonoxid-Dentalimplantate. Derartige Anwendungen von Keramik in der Hüftendoprothetik offenbarten in den 1970er bis 1990er Jahren jedoch erhebliche Risiken bzgl. ausreichender knöcherner Integration. Hintergrund hierfür war das bioinerte Verhalten der Werkstoffe sowie sogenanntes Stress-Shielding aufgrund des großen Steifigkeitsunterschiedes zwischen Knochen und Keramikkomponente. Dies kann zum Abbau des angrenzenden Knochengewebes aufgrund überhöhter mechanischer Beanspruchung führen.

Herausforderungen, Lösungsansätze und Forschungsbedarf

Um das Problem der fehlenden Osseointegration vollkeramischer Implantate zu lösen, werden derzeit unterschiedliche Konzepte verfolgt.

Durch eine gradiert offenporös gestaltete Randschicht kann Knochengewebe mikroretentiv verankern, auch wenn dadurch noch kein biochemischer Verbund zwischen Keramik und Knochen entsteht. Die mechanische Beanspruchbarkeit der Komponente sinkt durch die offenporöse Randschicht, was bei der Gestaltung der Komponenten berücksichtigt werden muss. Auch gezielte Mikrostrukturierungen der Keramikoberfläche durch innovative subtraktive oder auch additive Fertigungsverfahren werden erforscht.

Aktuell gibt es ebenfalls Aktivitäten, durch Plasma-Sprühen raue Titanschichten auf keramischen Oberflächen abzuschleifen. Solche Schichten finden bereits erfolgreiche Anwendung im Bereich zementfreier Metallimplantate. Alternativ oder additiv zur Oberflächengestaltung kann eine Beschichtung mit einer bioaktiven Mineralphase (z.B. Hydroxylapatit, HAp) das Anwachsen von Knochengewebe stimulieren.



Modell-Hüftpfanne der Größe 48/54 mit CeraPore-Beschichtung für eine verbesserte Retention der keramischen Oberfläche im Beckenknochen

Ziel der Forschungsaktivitäten ist eine haftfeste Aufbringung der Schichten ohne Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften der Keramik.

In jüngster Zeit gibt es verschiedenste Ansätze, die Effizienz dieses Beschichtungstyps zu steigern bzw. die Eigenschaften der Beschichtung in eine bestimmte Richtung zu beeinflussen. Ein sehr vielversprechender Weg ist die Beschichtung von Implantatoberflächen mit einer nanokristallinen Hydroxylapatitschicht. Die nanostrukturierten Oberflächen mit einer Dicke von einigen 10 nm verändern die grundlegende Topologie des Substrates nicht wesentlich und verbessern die hydrophilen Eigenschaften der Oberfläche signifikant. Letzteres führt zu einer schnellen Adsorption von Proteinen und Knochenzellen, was auch dafür sorgt, dass die Ansiedlung von infektiösauslösenden Bakterien deutlich verhindert wird („Race to the Surface“). Die deutliche Verbesserung der Osseointegration von Titan-basierten Dentalimplantaten konnte bereits an mehr als 15 präklinischen Studien nachgewiesen werden. Die Kombination dieser Technologie mit keramisch basierten Implantaten wird Gegenstand zukünftiger Entwicklungsaktivitäten sein.

Weitere Alternativen sind neueste Konzepte der chemischen Funktionalisierung der Keramikoberfläche durch sogenannte selbstorganisierende Monoschichten. Die Schichten werden chemisch bzw. chemo-physikalisch aufgebracht. Über haftvermittelnde Proteine kann dann ein biochemischer Verbund zum Knochengewebe erreicht werden. Ebenso können Schichten mittels Wachstumsfaktoren funktionalisiert werden.

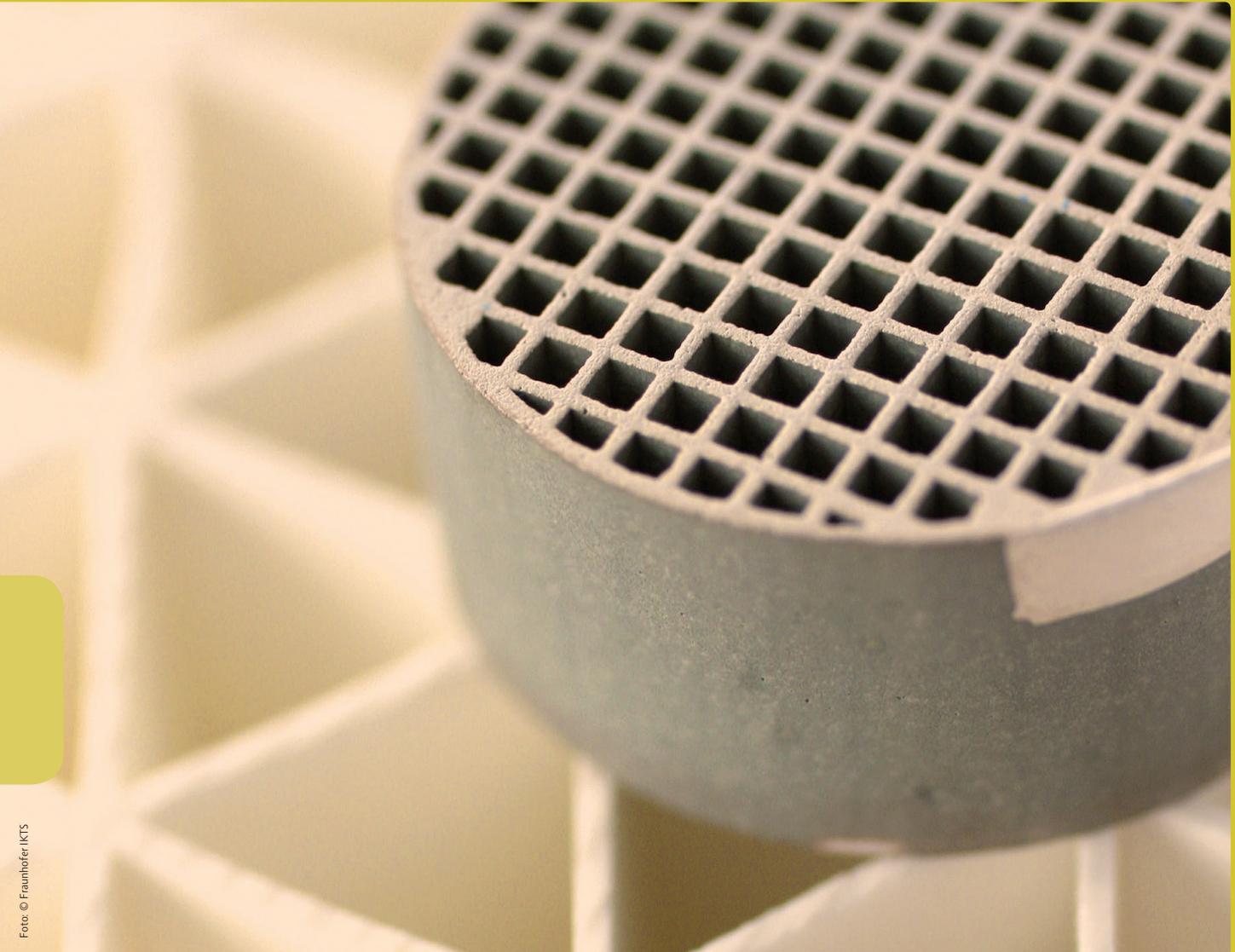
Ein weiterer Trend bei der Biofunktionalisierung von keramischen Oberflächen ist die Applikation von extrem dünnen, monolagigen Phosphatierungsschichten mit Dicken im Bereich von 1 nm, die kovalent an das Substrat gebunden sind. Dieser biomimetische Ansatz gewährleistet eine extrem stabile, dauerhafte Anbindung auch mit Blick auf das physiologische Umfeld im Bereich des Implantats und sorgt für eine extrem hydrophile Oberfläche. Weiterhin liefern die Phosphatgruppen einen hohen Anreiz für die Besiedlung durch die Knochenzellen und sorgen für ein Knochenwachstum von der Implantatoberfläche weg hin zu dem das Implantat umgebenden Knochen und somit für eine im Nanobereich direkte Ankopplung des Implantats.

Neben der Funktionalisierung der Oberflächen bzgl. verbesserten Einwachsens können Keramikimplantate auch mit antibakteriell wirkenden Substanzen versehen werden, um das Risiko implantatassoziiierter Infektionen zu verringern. In dieser Hinsicht können die osseointegrativ wirkenden Oberflächen zusätzlich mit antibakteriell wirkenden Metallionen (Kupfer-, Silberionen) bzw. antibiotikahaltigen Schichtsystemen funktionalisiert werden.

Auch bei Biogläsern können gezielt antibakterielle Eigenschaften genutzt werden. Die entsprechenden Mechanismen basieren auf der Absenkung des pH-Wertes im umgebenden Milieu durch die gezielte Abgabe entsprechender Ionen oder durch gezielte Zusätze von Silber-Ionen zum Bioglas, die wiederum antibakteriell wirken.

VI

Querschnittstechnologien



Neben den im Hauptteil dieser Expertenstudie behandelten anwendungsfeldbezogenen Zukunftspotenzialen für Hochleistungskeramiken werden im Folgenden ausgewählte Querschnittsaspekte und -technologien betrachtet. Hier wurden vor allem Gesichtspunkte mit material- und anwendungsübergreifender Bedeutung berücksichtigt. Daneben wurden Werkstoff- bzw. Verfahrensansätze ausgewählt, die aus aktueller Sicht ein interessantes Innovations- bzw. Synergiepotenzial aufweisen oder aktuellen Forschungstrends folgen, auch wenn sie bisher noch nicht in großem Umfang industriell genutzt werden.

Prozesstechnik und Verfahrenstechnik

Moderne keramische Verfahrenstechniken zielen auf die unter Kosten- und Zuverlässigkeitsaspekten optimierte Umsetzung anwendungsspezifischer Materialeigenschaften in serienfähige Komponenten, Produkte und Systeme.

Die Innovation in der keramischen Verfahrenstechnik vollzieht sich zum einen als ständiger evolutionärer Prozess der permanenten Weiterentwicklung. Zum anderen bedarf es für neue Materialien, Materialkombinationen, Produkte und Upscaling häufig spezifischer neuer Prozesstechniken.

Die 2007 publizierten Thesen des DKG-Fachausschusses Verfahrenstechnik^[7] leiten für Hochleistungskeramiken folgende prinzipielle Entwicklungsrichtungen ab:

- » Reduzierung von Größe und Häufigkeit von Defekten
- » Technologien zur Verarbeitung nanodisperser Ausgangsstoffe zu Mikrostrukturen
- » Technologien zur Formgebung von Compounds unterschiedlicher Eigenschaftsniveaus (Metall-Keramik-Glas-Polymer)
- » Begleitung der Entwicklung durch Modellierung und Simulation der Fertigungsprozesse

Die zurückliegenden Jahre haben in enger Zusammenarbeit von Experten längs der Technologieketten vom Rohstoff bis zum Bauteil einschließlich neu und weiterentwickelter Maschinen- und Gerätekonzepte eine Vielzahl von Fortschritten erbracht. Dieser evolutionäre Innovationsprozess verdient auch zukünftig permanente Aufmerksamkeit. Gleichzeitig bergen neue Verfahrenstechniken ein hohes Innovationspotenzial mit einer Querschnittswirkung über verschiedene Materialsysteme und Anwendungsfelder hinweg. Ausgewählten Schwerpunktaspekten, für die Experten eine zunehmende Bedeutung voraussagen, ist dieses Kapitel gewidmet.

Polymer- und Polymerabgeleitete Keramik

Bei der Polymerkeramik handelt es sich um Polymere, die mit anorganischen Additiven gefüllt sind und bei Temperaturen behandelt und eingesetzt werden, die noch polymere Anteile in der Matrix zulassen, während die polymerabgeleiteten Keramiken bei Pyrolysetemperaturen oberhalb der Zersetzungstemperatur der eingesetzten Polymere zu einer keramischen Matrix umgewandelt werden. Hierbei kommen meist siliciumbasierte Polymere wie Polysiloxane, Polysilazane oder Polycarbosilane zum

Einsatz, die über die klassischen Formgebungsverfahren der Kunststoffindustrie wie z.B. Spritzguss und Extrusion verarbeitet werden können. Um die grundsätzlichen Nachteile bei der Pyrolyse, wie hohe Schwindungsraten bzw. das Auftreten von Poren und Rissen während der Ausgasung der organischen Bestandteile zu überwinden, werden anorganische Füllstoffe zugesetzt. Über die Auswahl des Polymers und die Wahl der Füllstoffe lässt sich eine breite Vielfalt an Eigenschaften der resultierenden Verbundwerkstoffe verwirklichen.

Stand der Technik und Anwendung

Üblicherweise werden zu den siliciumhaltigen Polymeren, die in der Polymerkeramik bzw. polymerabgeleiteten Keramik verwendet werden, Materialien mit den Zusammensetzungen SiOC, SiNC, SiAlCN, SiBCN, SiAlCO und SiBNC gezählt. Die vielfältigen Verarbeitungsmöglichkeiten dieser polymeren Stoffsysteme in flüssiger, viskoser und fester Form (z.B. Spritzguss, Extrusion Resin Transfer Molding, Tauchbeschichtung, Inkjet-Drucken) sind neben den resultierenden Werkstoffeigenschaften das herausragende Merkmal dieser Technologie. Danach findet die Härtung bzw. Keramisierung über eine thermische Behandlung (Pyrolyse) statt. Auf diese Weise können auch komplexe Near-Net-Shape-Geometrien und -Strukturen verwirklicht werden, die ohne weiteres Schleifen oder Fräsen eingesetzt werden können. Zusätzlich lassen sich verbesserte thermomechanische Eigenschaften (z.B. Kriechen, Oxidationsbeständigkeit bis zu Temperaturen von 1500 °C) erzeugen und durch die Zugabe von Füllstoffen mechanische und elektrische Eigenschaften maßschneidern. Typische Einsatzgebiete sind:

- » Faserverbundwerkstoffe
- » Oxidationsschutzschichten
- » mikro- und nanomechanische Systeme
- » isolierende Gehäusebauteile
- » elektrisch leitfähige Massen
- » Elektrodenmaterial für Li-Ionen Akkumulatoren

Weitere Anwendungslösungen finden sich vorwiegend im Bereich von Werkstoffverbunden und Mehrkomponentensystemen unter erhöhten Anwendungstemperaturen dort, wo klassische Kunststoffe thermomechanisch oder hinsichtlich anderer funktionaler Eigenschaften versagen. Auch faserverstärkte Hochleistungsbremsmaterialien werden grundsätzlich entlang polymerkeramischer Routen hergestellt.

Herausforderungen und Lösungsansätze

Polymerbasierte Massen stellen oft hohe Anforderungen an die Verarbeitungstechnologien bzgl. der Vernetzungsaktivität sowie vorschneller Materialalterung, bei der Bereitstellung einer geeigneten Prozessausrüstung und bei der Gestaltung der Herstellungs- und Prozesstechnologien. Die Reaktivität der zum Einsatz kommenden Polymere erfordert die exakte Abstimmung der Zusammensetzung gefüllter polymerkeramischer Komposite für hohe Füllgrade und funktionelle Effekte einerseits und für stabile Verarbeitungsprozesse andererseits.



Labormuster UV-LED-Array mit polymerkeramischem Reflektorrahmen

Die Nutzung siliciumorganischer Polymere in anorganisch-organischen Kompositwerkstoffen eröffnet größere Spielräume für die Werkstoff- und die Komponentengestaltung.

Dies ergibt sich durch den Einsatz abgeleiteter Polymere, die z.B. neben Silicium weitere Elemente wie Bor und Titan enthalten. Weiteres Potential zur Einstellung bestimmter Materialzusammensetzungen ergibt sich durch angepasste thermische Umwandlungsprozesse der Polymersysteme.

Forschungsbedarf

Die grundsätzlichen Möglichkeiten der Verwendung in der Zusammensetzung angepasster, funktioneller Materialien und deren Formierung durch chemische Umwandlung führen nur dann zu verwertbaren Polymer- bzw. polymerabgeleiteten Keramiken, wenn die Möglichkeiten der Synthese der siliciumorganischen Polymere hinsichtlich ihrer strukturellen Zusammensetzung und des Einsatzes anwendungsspezifischer funktioneller Gruppen zur Steuerung des Vernetzungsmechanismus und der Oberflächeneigenschaften erschlossen werden. Dies umfasst auch die Umwandlungsprozesse der Polymere in Wechselwirkung mit reaktiven Füllstoffen unter thermischer Belastung einschließlich der Beeinflussung der visko-elastischen und mechanischen Eigenschaften der Polymer- bzw. polymerabgeleiteten Keramiken durch die Polymerstruktur und das Materialgefüge in den verschiedenen Umwandlungsstufen der Kompositsysteme.

Die Untersuchung des Potentials der Optimierung der plastischen Verarbeitung der Polymer- bzw. polymerabgeleiteten Keramiken in Form von z.T. hoch gefüllten warm- bzw. kaltplastischen Bulkmaterialien bzw. von Beschichtungssystemen ist ein weiterer Forschungsschwerpunkt. Dabei wendet sich der Fokus nicht nur auf die klassischen plastischen Formgebungsverfahren wie Pressen, Extrudieren oder Spritzgießen, sondern auch auf Verfahren wie Verguss und Tränkung, die vor allem für Applikationen der Elektromobilität und Umwelttechnik relevant sind.

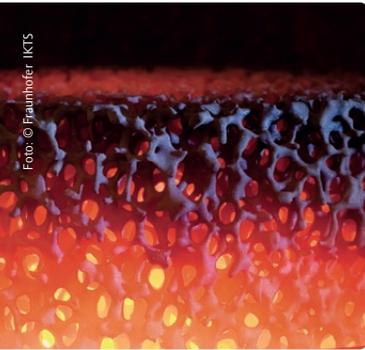
Zellulare keramische Werkstoffe

Relevanz

Die Forschung auf dem Gebiet der zellularen Keramiken und Gläser hat in den vergangenen zehn Jahren zu einer Reihe neuer Herstellungsverfahren und Prozessvarianten geführt, die gut beherrschbar sind. Es konnten deutliche Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften und der Struktursteuerung erzielt werden.

In zahlreichen Untersuchungen sind auch potentielle neue Anwendungsfelder adressiert worden. Ein großer Bedarf an optimierten und preiswerten Werkstoffen mit zellulärer offen- und geschlossenzelliger Struktur besteht besonders für die nachfolgend genannten Anwendungsgruppen:

- » in fluiddynamischen Prozessen aller Temperaturbereiche (Supportwerkstoff für Katalysatoren, Enzyme und Mikroben; Wärmeübertragerwerkstoff; Porenbrenner; Stofftrennung und -mischung)



Zelluläre SiC-Keramik-Strukturen
im Reaktionstest

- » in der thermischen Isolierung (Bedarf bei zellulären Keramiken und bei zellulären Gläsern)
- » in der Metallschmelzefiltration (hier besonders für die Tiefenfiltration zur Reduzierung von Einschlüssen und Fehlern → Leichtbau)
- » als Verstärkungsphase in Leichtmetallen

Besonders der Einsatz zellulärer Werkstoffe im Temperaturbereich jenseits der 1000 °C lässt auf einigen Gebieten (Wärmerückgewinnung, thermische Isolation etc.) eine deutliche Reduzierung von Primärenergie und somit eine Verminderung der CO₂-Emission erwarten.

Herausforderungen

Für einen breiteren Einsatz muss es gelingen, geeignete Werkstoffe zu identifizieren und für den Einsatz in heißen, korrosiv wirkenden Arbeits- und Abgasmedien, in vielen Fällen auch für Langzeitanwendungen zu befähigen und die thermisch-chemische Kompatibilität zu benachbarten Werkstoffen (z.B. Gehäusewerkstoffe, Werkstoffpaarung bei Temperaturen über 850 °C) herzustellen.

Aktuelle und künftige Herausforderungen werden bei zellulären keramischen Werkstoffen hauptsächlich bei der Hochtemperaturstabilität und der Homogenität der Zellstruktur gesehen.

Keramische Schäume werden seit einigen Jahrzehnten als Metallschmelzefilter eingesetzt und neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Reaktivfiltration sind angestoßen worden. Langfristig sind Herausforderungen bei der Entwicklung regenerierbarer Filter erkennbar; mittel- bis langfristig müssen das up-scaling und der Technologietransfer beherrschbar sein.

Forschungsbedarf

Möglichkeiten zur Festigkeitssteigerung werden in einem Werkstoffdesign mit Verstärkungsphase (Partikel und Fasern) und in einer homogeneren Zellstruktur (bei Schäumen) gesehen. Auf dem Gebiet der Hochtemperaturanwendungen (insbesondere Katalyse und Werkstoffpaarung) wurden Beschichtungen als zielführende Maßnahmen für ein einsatzspezifisches Grenz- und Oberflächendesign identifiziert. Verbesserungen der Isolationseigenschaften und damit die Reduzierung der Bauteilstärke lässt sich durch den gezielten Einbau von Reflektoren realisieren. Daraus leitet sich der folgende Forschungsbedarf ab:

- » vertieftes Verständnis der Funktionsweise von Schaumwerkstoffen mit Verbundstruktur; maßgeschneiderte Mikrostruktur mit Verstärkungsphasen
- » anwendungsspezifisches Grenz- und Oberflächendesign und Verständnis von Haft-, Korrosions- und Versagensmechanismen
- » Entwicklung und vertieftes Verständnis von Prozessen, die zu einer homogeneren und reproduzierbaren Zellstruktur führen sowie Erarbeitung von Prozessstrategien zur Generierung von Poren unterschiedlicher Größenskalen in ein und demselben Werkstoff

- » Verständnis des Werkstoffverhaltens bei mehrachsigen Spannungszuständen
- » Entwicklung serientauglicher Fertigungsprozesse, sowohl für endformnahe Fertigung, als auch für die effektive und präzise Bearbeitung zellulärer Keramiken

Einhergehend mit dem oben adressierten Forschungsbedarf ist es notwendig, die Auflösung der zerstörungsfreien Strukturermessung (vor allem die Mikrocomputer-tomographie) zu verbessern, sowie die zuverlässige und schnelle Erfassung von 3-D-Eigenschaften im Sinne einer Qualitätssicherung zu ermöglichen. Begleitend werden Simulationstools für die Beschreibung von Struktur und physikalischen Eigenschaften benötigt.

Additive Verfahren

Additive Fertigungsverfahren haben sich in den letzten Jahren von der ursprünglichen Idee, Musterbauteile bzw. Prototypen schnell und unmittelbar aus CAD-Daten ohne den Einsatz von Formen oder Werkzeugen herzustellen, zunehmend zur direkten Bereitstellung von Produkten entwickelt. Zu diesen Verfahren zählen u.a. Stereolithografie (STL), Selektives Lasersintern (SLS), Fused Deposition Modelling (FDM) und 3-D-Druck (3DP). Sie unterscheiden sich in der Art der Prozessführung und in der Art des Ausgangsmaterials. Das Spektrum reicht von lichtaushärtendem Polymer und keramischen Schlickern bei der Stereolithographie, über drahtförmige Halbzeuge (FDM) bis hin zu Pulvern. Allen Verfahren gemeinsam ist der schichtweise additive Aufbau der Komponenten und die sich daraus ergebende geometrische Gestaltungsfreiheit. Der Anwendungsfokus der generativen Verfahren bezieht sich für nahezu alle Werkstoffklassen vordergründig auf:

- » Bauteile in geringer Stückzahl
- » Bauteile mit individuellem Design
- » Bauteile mit komplexer Geometrie

Die Potentiale der Additiven Fertigung keramischer Komponenten sind bei weitem noch nicht erschlossen.

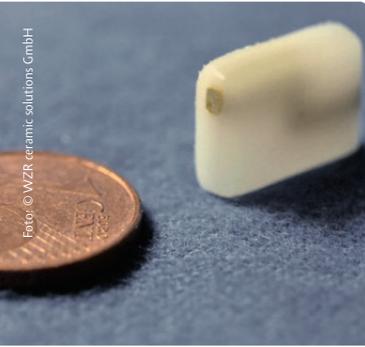
Im Bereich keramischer Komponenten ist der Einsatz dieser Verfahren noch nicht weit verbreitet. Die Ursache dafür ist unter anderem darin zu sehen, dass die notwendigen Maschinen und Ausgangsstoffe nicht oder nur eingeschränkt industriell zur Verfügung stehen. Allerdings haben die Aktivitäten im Bereich FuE deutlich zugenommen und erste Lösungen werden angeboten. So können kleine Bauteile aus dichtem Aluminiumoxid mittels STL gefertigt werden. Grundsätzlich besteht insbesondere für hochdichte Keramiken das Problem darin, die Sinterschwindung und die dabei auftretenden hohen mechanischen Spannungen zu beherrschen.

Die Potentiale der Additiven Fertigung keramischer Komponenten sind insofern bei weitem noch nicht erschlossen. Ziele laufender Entwicklungen sind größere Bauteile mit dichtem Gefüge, Erweiterung der Werkstoffpalette und die Bereitstellung von Maschinen für die industrielle Fertigung.



Keramikkomponenten hergestellt über die Lithografie-basierte LCM-Technologie

Foto: © LITHOZ



Mittels 3-D Multi-Material Druck hergestelltes Bauteil, bestehend aus einer Leiterbahn (Silber) in einem Isolierkörper (Glaskeramik)

Zukünftige attraktive Nutzungspotenziale beziehen sich auf Keramik-Lösungen, die mit etablierten Technologien nicht oder nur mit hohem Aufwand darstellbar sind, wie z.B.:

- » Bauteile mit gradierten Strukturen
- » innenliegende komplexe Kavitäten und Kanalstrukturen
- » Bauteile mit lokal variierbaren Materialeigenschaften
- » Bauteile aus mehreren Werkstoffen

In besonderem Maße bietet hier der 3-D-Druck viele Möglichkeiten, da mittels Binder keramische Feststoffpulver gedruckt werden können, die dann zu hohen Grundichten führen und die Herstellung dichter Keramik ermöglichen.

Durch lokale Funktionalitäten in einem Bauteil können z.B. elektrische Leiterbahnen in einem Isolationskörper integriert werden. Von dieser Idee ausgehend, können zukünftig 3-D-LTCC Komponenten entwickelt werden.

Als zukünftige zu bearbeitende FuE-Schwerpunkte ergeben sich:

- » Keramische Ausgangsstoffe für die Generative Fertigung
- » Erhöhung der Packungs- bzw. Grundichte
- » Prozessbegleitende Qualitätssicherung
- » Software-Lösungen zur Verarbeitung von Volumeninformationen
- » Prozesskompatible Zubereitungen aus Keramik und Hilfsstoffen

Generative Fertigungsverfahren ermöglichen die Herstellung völlig neuartiger Komponenten und können damit neue Anwendungen erschließen.

Feldunterstützte Sintertechnologien

Relevanz und Stand der Technik

Gegenwärtig werden 7 % des gesamten primären Energiebedarfs in Deutschland für industrielle Temperaturbehandlungen über 1000 °C, welche für die Produktion von Metall- und Keramikbauteilen benötigt werden, verwendet.

Die Verwendung von externen elektrischen und magnetischen Feldern mit Frequenzen bis in den Mikrowellenbereich hinein eröffnet einen zusätzlichen Freiheitsgrad für Materialsynthese, Mikrostrukturen und letztendliche Eigenschaften aufgrund der Beschleunigung oder Hemmung von Reaktionen, der Stabilisierung von metastabilen Phasen, der unabhängigen Kontrolle des Kornwachstums sowie der Möglichkeit zur endformnahen Fertigung mit hohen Verformungsgeschwindigkeiten unter reduziertem Druck und Temperatur.

Die Feld-aktivierte Sinter-Technologie / Spark Plasma Sintering (FAST / SPS) ist eine mit gepulstem Gleichstrom aktivierte niederspannungs-, druckunterstützte Sinter- und Synthesetechnologie.

Infolge der direkten Beheizung durch den Stromdurchgang der Matrize und der Stempel sind Sinterzyklen mit Heizraten bis zu 1000 °C/min umsetzbar und ermöglichen eine signifikante Reduktion der gesamten Prozesszeit sowie der Energiekosten. Durch die Anwendung von Standard Graphit Werkzeugen liegen die maximal erreich-

baren Temperaturen bei bis zu 2400 °C. Standard-Kühlraten von bis zu 150 K/min sind möglich; zusätzliche aktive Kühlung unter Gasfluss erlaubt Abkühlraten von 400 K/min. Dazu verstärkt der gleichzeitige Einsatz von uniaxialem mechanischem Druck die Verdichtung (maximale Last typischerweise zwischen 50 und 250 kN).

Die Gesamtanzahl an FAST/SPS Geräten oder Äquivalenten, die derzeit in der Welt installiert sind, wird auf 1750 (mit 2/3 in der Industrie) geschätzt.

Herausforderungen und Lösungsansätze

Der Einsatz und die Ausrichtung der FAST / SPS-Technologie fokussiert sich derzeit u.a. auf folgende keramische Materialaspekte:

- » Ultrahochtemperaturkeramiken wie Boride, Carbide und Nitride von Zr, Ti, Hf und Ta mit Schmelztemperaturen höher als 3000 °C
- » Transparente Keramiken wie z.B. Yttrium-Aluminium-Granat, reine oder mit Seltenen dotierte Materialien und Magnesium-Aluminium-Spinell
- » Einstellung funktionaler Eigenschaften von Keramiken wie z.B. thermische oder elektrische Leitfähigkeit, di-, piezo- und ferroelektrische Eigenschaften, magnetische Eigenschaften, z.B. durch die nanometrische Kornstruktur
- » für die Entwicklung von Gradientenwerkstoffen bestehen ebenfalls interessante Potenziale über FAST / SPS-Technologien
- » Wichtige Potenziale ergeben sich über FAST/SPS-Technologien auch für die Realisierung von Nichtgleichgewichtsmaterialien. Diese können durch konventionelle Sinterverfahren nicht erzeugt werden, weil sie reagieren oder auf Grund ihrer Metastabilität unter atmosphärischem Druck und / oder Temperatur sich in eine neue Phase umformen. Solche Nichtgleichgewichtsmaterialien können neue interessante Kombinationen von mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften aufweisen. Z.B. wird die Bildung von Diamant aus Fulleren C60 ohne Katalysatoren durch den Betrieb von FAST / SPS unter weitaus ‚milderen‘ Bedingungen ermöglicht, als üblicherweise zur Diamantproduktion benötigt werden.

Um die FAST / SPS Technologie zur Reife zu bringen, sind ungeachtet aller bisherigen technischen Fortschritte noch viele Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erforderlich.

Die Schaffung einer homogenen Temperaturverteilung innerhalb sehr großer Teile stellt eine aktuelle Herausforderung dar. Die neuesten FAST / SPS Anlagen erlauben Durchmesser von bis zu 400 mm von gesinterten Bauteilen. Eine erfolgreiche Hochskalierung zu größeren Probendimensionen oder komplexeren Bauteilformen als die typischen scheibenförmigen Geometrien erfordert aber die Verwendung von verlässlichen Prognosemethoden, wie die Finite-Elemente-Modellierung im Multi-skalenbereich unter Berücksichtigung spezifischer Prozessparameter, um realistische Vorhersagen treffen zu können.

Die treibende Kraft in der Werkzeugentwicklung ist die Ermöglichung der flexiblen Produktion von komplexeren oder endformnahen Bauteilen und die Erhöhung der Produktivität durch das Sintern größerer oder mehrerer Teile in einem Zyklus. Die Kosten der Endbearbeitung und der Verlust von Rohmaterial durch Sägen und Schleifen kann somit reduziert werden. Auch hier sind FEM-Berechnungen unter Berücksichtigung des realen Materialverhaltens notwendig.

Schließlich können je nach Art der Anwendung neue, passende Materialien für Werkzeuge benötigt werden. Graphit, welches in den meisten Fällen verwendet wird, kann mit Kohlenstofffasern verstärkt werden, um die mechanische Festigkeit zu erhöhen. Für Sintertemperaturen unterhalb 1000 °C werden Stahl und Refraktärmaterialien, wie z.B. TZM-Molybdänlegierungen oder Kupfer-Beryllium verwendet.

Forschungsbedarf

Es sind grundlegende Untersuchungen notwendig, um die mitunter temporären Mechanismen, an denen hohe Heiz- und Kühlraten beteiligt sind, zu verstehen. Eine wesentliche Fragestellung lautet: Was sind die Wechselwirkungen zwischen elektrischem/magnetischem Feld und Defektbildung, Struktur und Mobilität?

Die Anwendung von moderaten elektrischen Feldern führt zu einer Verstärkung in der Verdichtung offensichtlich aufgrund einer signifikanten Hemmung des Kornwachstums. Oberhalb eines kritischen elektrischen Feldes findet eine plötzliche Verdichtung innerhalb weniger Sekunden, bei Ofentemperaturen weit geringer (bis zu 500 °C Differenz) als gewöhnlich benötigt, statt. Ein weiteres essentielles Ziel besteht darin, atomistische Mechanismen mit makroskopischem Verhalten in einem mehrskaligen Modellierungsentwurf zu verknüpfen. Effekte von elektrischem Strom / Feld auf Massetransport, Reaktivität, mikrostrukturelle Entwicklung, Formbarkeit und letztendlich erreichbare Eigenschaften müssen besser verstanden werden. Entgegen aller Vorzüge ermöglichen kommerzielle SPS Systeme tatsächlich nur eine geringe Auswahl an Möglichkeiten, elektrische Felder zu benutzen.

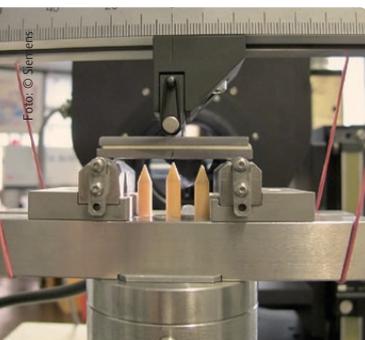
Lebensdauer und Zuverlässigkeit

Relevanz und Stand der Technik

Eine grundlegende Herausforderung bei der Anwendung von Struktur- als auch Funktionskeramik stellt auch weiterhin das Spröbruchverhalten und die damit verbundene geringe Bruchzähigkeit dar, das trotz kontinuierlicher Verbesserung den häufigeren Einsatz von Keramik erschwert. Das Versagensverhalten ist hierbei nicht nur werkstoffbedingt, sondern vor allem auch durch konstruktive Schwächen der Keramikkomponenten bedingt.

Keramiken weisen in der Regel eine sehr hohe Druckfestigkeit auf, während ihre Zugfestigkeit wesentlich geringer (typischerweise 1/10 oder sogar weniger) ist.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden keramische Werkstoffe entwickelt, deren Zugfestigkeit jener von mittel- und hochfesten Stählen entspricht und die diese hohen Festigkeiten zum Teil auch bis zu Temperaturen über 1000 °C beibehalten. Ein Problem stellt allerdings die hohe Streuung der Zugfestigkeit dar, da die Festigkeit von Keramiken eine probabilistische Größe ist, d.h. es gibt einen Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Versagenswahrscheinlichkeit. Daher existiert der Begriff der ‚Festigkeit‘ im Sinne einer deterministischen Festigkeit wie bei Metallen bei Keramiken nicht, sondern muss durch die ‚Bruchspannungsverteilung‘ ersetzt werden. Spezielle Postprozessoren als Teil eines FEM-Systems (Finite-Element-Methoden) ermöglichen dann Aussagen zur Kurzzeit (als auch Langzeit-) Bruchwahrscheinlichkeit.



Messanordnung zur Bestimmung der Bruchfestigkeit

Wie bei Metallen und Kunststoffen gibt es auch bei Keramiken Mechanismen, welche die Bruchspannung im Einsatz zeitabhängig herabsetzen (Ermüdung). So hat es sich gezeigt, dass bei Keramiken Risse auch bei einer mechanischen, chemischen oder thermischen Beanspruchung (langsam) wachsen können, bis es bei Erreichen einer kritischen Rissgröße zur spontanen Rissausbreitung kommt. Die Erfassung der Daten für die Rissausbreitung gestaltet sich aufwendig und erfordert wegen der Vielzahl der Einflussgrößen einen auf den Einsatzfall exakt zugeschnittenen Versuchsaufbau. Daher sind zwar viele Parametersätze verschiedener Keramiken über Standardversuche (z.B. dynamischer Biegeversuch, DCB, CT, etc.) bekannt, deren Übertragung auf den jeweiligen Einsatzfall ist aber nur bedingt direkt möglich.

Neben werkstofflichen Maßnahmen zur Erhöhung der Bruchzähigkeit (Mehrphasen-Keramik) ermöglichen faserverstärkte Keramiken wesentliche Verbesserungen des mechanischen Verhaltens. Faserverstärkte Keramiken weisen eine höhere Zuverlässigkeit auf, bei der kein sprödes Versagen mehr auftritt und ein Mindestwert für die Festigkeit garantiert werden kann.

Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Die theoretischen Grundlagen für das Verständnis von Zuverlässigkeit und Lebensdauer keramischer Bauteile sind bereits seit langem etabliert. Trotzdem kommt es in der Anwendung sowohl bei Struktur- als auch bei Funktionskeramiken immer wieder zu unerwarteten Ausfällen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die bei Metallen und Kunststoffen üblichen Verfahren zur Ermittlung der Bauteilbeanspruchung weitgehend unkritisch auf Keramiken übertragen werden.

Wie oben ausgeführt kann eine qualifizierte Aussage zur Kurz- oder Langzeitbeanspruchbarkeit von Komponenten nur über numerische Verfahren im Vorfeld der Konstruktion vorgenommen werden. Dies beinhaltet immer eine Unschärfe in der Annahme der Kennwerte, welche wiederum die Güte der Vorhersage beeinflusst. Allerdings lassen sich mittels FEM im Vorfeld Konstruktionsalternativen bestimmen, die dann zur Reduktion von Musterkosten und Entwicklungszeiten maßgeblich beitragen. Die Betrachtung mittels FEM lässt sich gut auf fägetechnische Fragestellungen für stoffschlüssige (Kleben, Hartlöten) oder formschlüssige (Schrumpfen) Keramik/Keramik- oder Metall/Keramik-Verbindungen anwenden. Die Einbeziehung der FEM in den Konstruktionsprozess ist heute bereits ein unverzichtbares Tool zur Auslegung hochbeanspruchter Keramik- bzw. Keramik/Metall-Bauteile geworden.

Das ‚Integrative Konstruieren‘ mit Keramik ermöglicht so eine auf die jeweilige Anforderung maßgeschneiderte Lösung, welche vor dem Erstellen von Prototypen die Auswahl von Alternativen anbietet.

Besonders anspruchsvoll gestaltet sich die Bauteilauslegung für Anwendungen mit schwingender Beanspruchung. Hierfür ist das Werkstoffverhalten unter wechselnder mechanischer Belastung wichtiges Entscheidungskriterium. Die für die Lebensdauermodellierung erforderlichen Daten müssen in aufwendigen Testversuchen ermittelt werden, wobei Dauerschwingverhalten (HCF-high cycle fatigue) und Niedriglastwechsel-Ermüdung (LCF-low cycle fatigue) zu unterscheiden sind.



Bestimmung der Inertfestigkeit von Hochleistungskeramiken

Forschungs- und Handlungsbedarf

Es besteht vor allem Bedarf, die bereits grundsätzlich entwickelten Konzepte zur Auslegung und Bewertung von keramischen Bauteilen so zu vermitteln, dass sie unmittelbar von Design-Ingenieuren angewendet werden können. Dies erfordert Anstrengungen, die in interdisziplinären Gemeinschaftsprogrammen besonders effektiv erarbeitet werden können. Wichtige Fragestellungen beziehen sich hierbei auf:

- » Werkstoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaftskombinationen (z.B. hohe Wärmeleitfähigkeit $>200 \text{ W/mK}$ und hoher Ausdehnungskoeffizient zur Anbindung an Metalle; Heat-sinks)
- » Weiterentwicklung von keramischen Schichten für die Verschleißminimierung oder gezielte ‚Keramisierung‘ für elektrische Isolation
- » Entwicklung von Designkonzepten für Verbundsysteme und Vielschichtbauteile
- » Hochschulkurse für ‚Konstruieren mit Keramik‘ in der Ausbildung von Maschinenbauern
- » Schulung von Technikern und Ingenieuren zur Bearbeitung von Keramiken und im Umgang mit keramischen Bauteilen

Die ‚keramikgerechte Konstruktion‘ benötigt einen integrativen Ansatz unter intensiver Einbindung der FEM. Um Modellierungsmethoden noch breiter für neu zu entwickelnde Hochleistungskeramiken, Bauteile und deren Systemintegration für Anwendungen unter komplexen Beanspruchungen einsetzen zu können, ist Forschungsarbeit mit folgenden Schwerpunkten erforderlich:

- » Strategien zur Vorhersage von Performance und der Lebensdauer (Langzeitstabilität) keramischer Bauteile in Systemanwendungen
- » Multiskalige Modellierung und Simulation von Eigenschaften und Zuverlässigkeit von keramischen Bauteilen
- » Aufbau von Datenbanken für multiskalige Werkstoffparameter für spezielle keramische Bauteile, unter Berücksichtigung der Mikro- und Nanostruktur der Werkstoffe
- » Optimierung von Modellen zur Auslegung von keramischen Werkstoffen, Komponenten und Strukturen mit hoher Zuverlässigkeit
- » Entwicklung von analytischen Verfahren zur Bewertung und Optimierung der Zuverlässigkeit keramischer Schichten

Das ‚Integrative Konstruieren‘ mit Keramik ermöglicht eine auf die jeweilige Anforderung maßgeschneiderte Lösung, welche vor dem Erstellen von Prototypen die Auswahl von Alternativen anbietet.

Material- und Prozessdiagnostik

Relevanz

Eine fortgeschrittene Material- und Prozessdiagnostik stellt ein wesentliches Instrument zur kontinuierlichen Verbesserung des Qualitäts- und Zuverlässigkeitsniveaus

unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Kostenaspekte bei der Entwicklung und Fertigung von Hochleistungskeramiken dar. Dabei verstärkt sich in den letzten Jahren deutlich der Trend zur prozessbegleitenden Kontrolle und Überwachung. Andererseits wachsen die Herausforderungen an die Materialdiagnostik besonders im Hinblick auf immer feiner werdende Strukturen vom sub- μ - und den nm-Bereich, die Analyse von Schicht- und Verbundstrukturen vor allem in Multimaterialsystemen sowie die zerstörungsfreie Prüfung an Werkstoffen und komplexen Bauteilen.

Herausforderungen und Lösungsansatz

Für die Prozesskontrolle bzw. das Monitoring technologischer Abläufe sowohl in der Fertigung als auch bereits in der Entwicklungsphase werden folgende Aufgabenschwerpunkte abgeleitet:

- » Identifizierung und Einsatz der geeignetsten analytischen Methode (zerstörungsfreies Verfahren) zur Prozesskontrolle, um eine hohe Ausbeute bei der Fertigung zu sichern / fertigungsintegrierte Prüfverfahren
- » Verringerung der Zeiten für die Aufnahme und die Auswertung der Messdaten (time-to-data, throughput-Erhöhung)
- » Schnelle, sichere und möglichst berührungsfreie Erkennung von Prozessfehlern
- » Ausbau des Know-How zur Interpretation von Abweichungen vom POR

Bei der Qualitätskontrolle bzw. Fehleranalyse von Keramikwerkstoffen bzw. Bauteilen ergeben sich Herausforderungen unter folgenden Aspekten:

- » Verringerung der Ausschussquoten bei keramischen Bauteilen (Mikrorisse, Verunreinigungen)
- » schnelle, sichere und berührungslose Fehlerdetektion bei der Prüfung keramischer Halbzeuge und Bauteile
- » Bewertungssysteme für Fehler / statistische Auswertung
- » Ausbau des Know-how zur Fehlerdetektion und -analyse, Fehlerkataloge für neue Materialien und Systeme

Forschungs- und Handlungsbedarf

Aus den oben genannten Herausforderungen leitet sich material-, bauteil- und anwendungsspezifisch entwicklungsbegleitender Forschungsbedarf unter folgenden Aspekten ab:

- » Entwicklung und Optimierung analytischer Methoden zur in-line Prozesskontrolle mit hohem Durchsatz, insbesondere für neue Produkte (Energietechnik: Batterien, Brennstoffzelle)
- » Entwicklung und Erprobung neuer analytischer Methoden zur in-line Prozesskontrolle zur Herstellung innovativer keramischer Produkte mit Nanostrukturen (Nanopartikel, Nanoporosität, 1-D und 2-D-Strukturen) und deren Verteilung (Homogenität)
- » Entwicklung und Einführung neuer analytischer Methoden zur in-line Prozesskontrolle von keramischen Schichten (TBC, EBC, Pasten, ...), inkl. Beurteilung der Grenzflächen



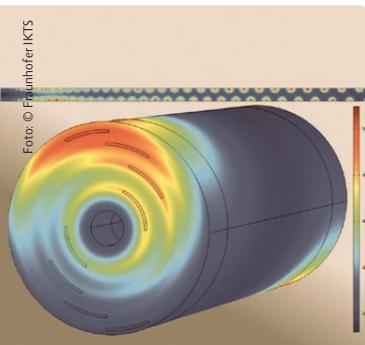
Bestimmung der Viskosität am Rheometer

- » Entwicklung und Optimierung analytischer Methoden zur Qualitätskontrolle und zur physikalischen Fehleranalyse von keramischen Bauteilen und von keramischen Schichten (TBC, EBC, Pasten, ...), inkl. Beurteilung der Grenzflächen
- » Entwicklung und Erprobung neuer analytischer Methoden zur Qualitätskontrolle innovativer keramischer Produkte mit Nanostrukturen (Nanopartikel, Nanoporosität, 1-D und 2-D-Strukturen)
- » Entwicklung und Anwendung von analytischen in-situ Methoden zur Untersuchung kinetischer Prozesse, die zur Schädigung und zum Versagen / Ausfall keramischer Bauteile führen können.

Materialmodellierung

Relevanz

Die Modellierung und Simulation auf der Werkstoffebene beschäftigt sich mit der Berechnung und Vorhersage von spezifischen Werkstoffeigenschaften und Werkstoffverhalten durch Entwicklung und Anwendung von Modellen für die atomare über die mesoskopische bis zur makroskopischen Ebene. Dies kann insbesondere bei den komplexen Werkstoffsystemen der Hochleistungskeramik zur effizienteren Auswahl geeigneter Zielverbindungen beitragen und damit den meist (zu) langen Innovationszyklus keramischer Werkstoffe von über 10 Jahren merklich verkürzen. Mittels der nationalen Förderinitiative ‚Materials Genom Initiative‘ in USA soll mit Hilfe solcher Modellierungsmethoden zusammen mit großen verfügbaren Materialdatenbanken und angepassten experimentellen Methoden (Hochdurchsatztechnologien) der Zeitaufwand für die Entdeckung, Entwicklung und Herstellung neuer Werkstoffe halbiert werden. Dieser anspruchsvolle Ansatz birgt beachtliches Potenzial und muss auch für die deutsche Forschungslandschaft Ansporn zu eigenen nachhaltigen Aktivitäten sein, wie sie in der Vergangenheit begonnen wurden.



Thermische 3D-Modellierung von Li-Ionen-Batteriezellen

Das hohe Nutzungspotenzial der Materialmodellierung von Hochleistungskeramik für Wettbewerbsfähigkeit, Innovation und nationale Alleinstellungsmerkmale muss durch Bündelung der anerkannten deutschen Forschung gehoben und konzertiert umgesetzt werden.

Herausforderungen und Lösungsansätze

Folgende Maßnahmen erscheinen aus einer grundlegenden Betrachtung erstrebenswert:

- » Ausbau der vorhandenen Kompetenzen im ‚akademischen‘ Bereich mit Fokus auf komplexe keramische Stoffsysteme und relevanten neuen Anwendungspotenzialen (z.B. Magnetwerkstoffe, Batteriewerkstoffe, Gasturbinenwerkstoffe)
- » Aufbau eines Kompetenznetzwerkes für geschlossene Modellierungsketten
- » Einbindung industrieller Gruppen und Berater zur ingenieurgerechten Auslegung von Fragestellung und Tools
- » Nutzerfreundliche Geschäftsmodelle zur industriellen vorwettbewerblichen Nutzung der Methoden und Expertise

Forschungs- und Handlungsbedarf

Der Forschungsbedarf liegt zunächst in der weiteren Entwicklung geeigneter Werkstoffmodelle, die bis in die Beschreibung der grundlegenden atomaren Wechselwirkungen in keramischen Verbindungssystemen und Kristallstrukturen führt. Die Spezifika hängen dabei von den jeweiligen Stoffsystemen und Fragestellungen ab und können hier nicht im Einzelnen aufgezählt werden. Als übergeordnete Aufgaben ergeben sich folgende Aspekte:

- » Entwicklung und Optimierung von atomaren Wechselwirkungspotenzialen für die Vielfalt der Metalloxide, -nitride und analogen Verbindungen sowie deren Bereitstellung
- » Ausbau handhabbarer Multiskalen-Modelle und Simulationsverfahren
- » Validierung der Werkstoffmodelle
- » Entwicklung und Anpassung von Tools für die Industrie im FuE-Alltag (analog zu FEM)

Auch wenn bei kritischer Betrachtung diese Ansätze als unrealistisch ehrgeizig erscheinen, muss dieser Disziplin hohe Aufmerksamkeit und hoher Einsatz geschuldet werden.

Fazit

Die Expertenstudie zu den zukünftigen Herausforderungen und Forschungsausrichtungen für Hochleistungskeramiken ist das Ergebnis eines intensiven Dialogs zwischen Fachleuten aus Industrie und Forschungsinstitutionen. Sie vermittelt wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Orientierungen zu bestehenden und neueren Anwendungen von Hochleistungskeramiken in den zukunftsrelevanten Anwendungsfeldern Energie, Chemie-, Maschinen- und Anlagenbau, Mobilität, Elektrotechnik, Optik und Medizintechnik. Zusätzlich werden technische und wissenschaftliche Querschnittsthemen behandelt, die für die zukünftigen Entwicklungen bedeutsam sind und vielversprechende Innovationsimpulse liefern können. Schon heute dienen Hochleistungskeramiken als Schlüsselkomponenten in industriellen Anwendungen und Systemen in nahezu allen Branchen und tragen entscheidend zum Geschäftswert längs der gesamten Wertschöpfungskette bei. Um den zukünftigen Anforderungen gerecht werden zu können, erbrachte die Studie folgende branchen- und anwendungsfeldübergreifende Kernaspekte für die gemeinsamen Innovationsanstrengungen von Industrie und Wissenschaft:

- » Keramische Hochleistungswerkstoffe erfordern die Weiterentwicklung des Eigenschafts-Mikrostruktur-Verständnisses, um das Leistungspotenzial voll auszuschöpfen und neuartige Werkstoffkonzepte zu ermöglichen. Gegenüber monolithischen Keramiken wird keramischen Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden sowie hybriden Kompositen auf Basis von Keramik-Metall-Polymer-Kombinationen ein hohes Innovationpotenzial zugeschrieben. Hierbei nimmt die Werkstoff-Kompatibilisierung einschließlich keramischer Beschichtungen und Multimaterialsysteme sowohl für die Prozesssierung als auch für das Verhalten in der Anwendung eine entscheidende Rolle ein.

- » Alle keramischen Werkstoffklassen, Produkte und Anwendungsfelder erfordern eine intensive Weiterentwicklung innovativer Prozessketten von der Rohstoffebene bis zur Systemintegration. Neben evolutionären Fortschritten für bestehende Fertigungsverfahren können vor allem neuartige Technologien, wie z.B. additive Herstellungsverfahren oder feldunterstützte Sinterverfahren, disruptive Innovationen ermöglichen. In diesem Zusammenhang stellen das industrielle Up-Scaling, die Kosten-, Material- und Energieeffizienz, höchste Fertigungsausbeute bis hin zur anwendungsspezifischen Prozessauslegung weiterhin die generellen Herausforderungen für den Markterfolg dar.
- » Für die Anwendungsverbreiterung und Erschließung neuer Applikationen spielen keramikgerechtes Design durch FEM-basierte Simulation der Bauteilbelastung und des Bauteilverhaltens, die Kosten-Nutzen-Bewertung auf Systemebene und für den vollständigen Lebenszyklus sowie die Lebensdauer und Zuverlässigkeitsvorhersage eine zunehmend wichtige Rolle. Neue Chancen ergeben sich auch in bislang keramik-untypischen Bereichen, wie z.B. in der Batterietechnik oder bei Magnetwerkstoffen durch Nutzung keramischer Verfahrenstechniken und Werkstoffauslegungen.
- » Als Querschnittstechnologien werden neben der weiter zunehmenden Interdisziplinarität die Werkstoff-Diagnostik und Multiskalen-Modellierung für Werkstoffe und Bauteile erheblich an Bedeutung gewinnen. Die Werkstoff-Diagnostik muss hierbei die Werkstoffcharakterisierung mit der Verhaltens- und Fehleruntersuchung verbinden und wird u.a. signifikante Daten für eine präzisere Werkstoffsimulation liefern. Insgesamt werden detailliertere Werkstoffmodelle benötigt, die der komplexen Werkstoffarchitektur der Keramik gerecht werden. Dies bezieht sich auch auf die Multiskalen-Simulation keramischer Werkstoffe, die sowohl im Bereich der atomaren Wechselwirkungen für Vielkomponentensysteme als auch für die Bereitstellung handhabbarer und industrialisierbarer Software-Tools noch erheblichem Entwicklungsaufwand bedarf.

Die zukünftige Erschließung des Innovationspotenzials keramischer Hochleistungswerkstoffe und -technologien und die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands auf diesen Gebieten wird ganz wesentlich von der stärkeren Vernetzung zwischen interdisziplinärer Grundlagen- und Vorlaufforschung und der anwendungsbezogenen Produkt- und Technologieentwicklung bis hin zur Systemintegration abhängen. Diese Gemeinschaftsaufgabe erfordert vor allem langfristig orientierte Förderprogramme der öffentlichen Hand mit intensiver und strategischer Einbindung der Anwender- und erzeugenden sowie verarbeitenden Keramikindustrie. Im Interesse der Stärkung der ‚keramik-abhängigen‘ Branchen der deutschen Wirtschaft im globalen Wettbewerb können so hoch risikobehaftete Innovationen wirkungsvoll unterstützt und gleichzeitig der für die Zukunft erforderliche wissenschaftlich-technische Nachwuchs auf dem Gebiet der Hochleistungskeramik gesichert werden.

Autoren

Prof. Dr. Robert Danzer, Universität Leoben

Dr. Jens Eichler, 3M Deutschland GmbH

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Fischer,

Universitätsklinikum RWTH Aachen;

Vorsitzender AK Biokeramik GA HLK DKG/DGM

Prof. Dr. Olivier Guillon, FZ Jülich GmbH;

Vorsitzender FA FAST/SPS DGM

Martin Hartmann, Verband der Keramischen Industrie e. V.;

Fachgruppe Technische Keramik

Dr. Michael Höge, OSRAM GmbH

Klemens Joachim, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V.

Dr. Isabel Kinski, Fraunhofer IKTS

Prof. Dr. Wolfgang Kollenberg, WZR Ceramic Solutions GmbH;

Vorsitzender FA Additive Fertigung DGM

Dr. Alfons Kelnberger, CeramTec GmbH

Gert Lindemann, Robert Bosch GmbH

Dr. Reinhard Lenk, CeramTec GmbH

Thomas Oberbach, Mathys Orthopädie GmbH

Dr. Wolfgang Rossner, Siemens AG;

Stellv. Vorsitzender KA GA HLK DKG/DGM

Prof. Dr. Michael Scheffler, Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg

Ralph Schubert, Fraunhofer IKTS

Dr. Manfred Schweinzger, EPCOS OHG

Prof. Dr. Michael Stelter, Fraunhofer IKTS

Prof. Dr. Jörg Töpfer, Ernst-Abbe-Hochschule Jena;

Vorsitzender AK Funktionskeramik GA HLK DKG/DGM

Dr. Ingolf Voigt, Fraunhofer IKTS;

Vorsitzender AK Keramikmembranen GA HLK DKG/DGM

Dr. Bärbel Voigtsberger, Fraunhofer IKTS;

Vorsitzende KA GA HLK DKG/DGM

Dr. Holger Wampers, LAPP Insulators Alumina GmbH

Dr. Berit Wessler, OSRAM GmbH

Prof. Dr. Ehrenfried Zschech, Fraunhofer IKTS

Weitere Mitwirkende (Workshops)

Heinz Albert, Cera System GmbH

Dr. Ulrich Alkemade, Robert Bosch GmbH

Dr. Petra Auchter-Krummel, Schott AG

Dr. Stefan Barth, Fraunhofer IKTS

Dr. Pedro da Silva, Robert Bosch GmbH

Dr. Ulrich Eisele, Robert Bosch GmbH

Prof. Dr.-Ing. Uwe Gärtner, Daimler AG

Dr. Michael Heß, Samson AG

Dr. Mathias Herrmann, Fraunhofer IKTS

Prof. Dr. Thomas Hirth, Fraunhofer IGB

Prof. Dr. Michael Hoffmann, KIT

Prof. Dr. Helmut Jaberg, Technische Universität Graz

Dr. Andreas Kienzle, SGL CARBON GmbH

Dr. Oliver Krauss, Verein Deutscher Ingenieure VDI

Prof. Walter Krenkel, Universität Bayreuth

Prof. Dr. Thomas Koch, KIT

Ulrich Kunze, 3M Automotive Division

Dr. Frank-Thomas Lentjes, Schott AG

Helmut Mayer, Friatec AG

Dr. Xenia Molodova, DFG

Dr. Anja Naake, Volkswagen AG

Dr. Detlev Nicklas, DKG

Dr. Karen Otten, FZ Jülich GmbH

Michael Philipps, Endress+Hauser GmbH+Co. KG

Dr. Angelika Priese, Imerys AG

Dr. Torsten Rabe, Bundesanstalt für Materialprüfung

Dr. Friedrich Raether, Fraunhofer ISC

Dr. Gert Richter, CeramTec GmbH

Andreas Schletz, Fraunhofer IISB

Prof. Dr. Gerhard Schneider, Hochschule Aalen

Dr. Hans-Jürgen Schreiner, CeramTec GmbH

Dr. Rainer Schultze, Projektträger Jülich

Robert Simolka, FCT Hartbearbeitungs-GmbH

Hagen Steller, DGM

Dr. Bernd Utz, Siemens AG

Dr. Hartwig Voss, BASF AG

Ulrich Werner, Barat Ceramics GmbH

Dr. Gerhard Wötting, FCT Keramik GmbH

Dr. Michael Zins, Fraunhofer IKTS

Quellenangaben

- [1] EUROPEAN COMMISSION (HRSG.): MATERIALS ROADMAP ENABLING LOW CARBON ENERGY TECHNOLOGIES. BRÜSSEL, 2011
- [2] KPMG AG WIRTSCHAFTSPRÜFERGESELLSCHAFT (HRSG.): EXPECT THE UNEXPECTED. BUILDING BUSINESS VALUE IN A CHANGING WORLD, 2012, URL [HTTP://WWW.KPMG.COM/GLOBAL/EN/ISSUESANDINSIGHTS/ARTICLESPUBLICATIONS/PAGES/BUILDING-BUSINESS-VALUE.ASPX](http://www.kpmg.com/global/en/issuesandinsights/articlespublications/pages/building-business-value.aspx) 12.2.2013
- [3] FREIMAN, STEPHEN (2007): GLOBAL ROADMAP FOR CERAMICS AND GLASS TECHNOLOGY. HOBOKEN, N.J, CHICHESTER: WILEY; JOHN WILEY, 2007
- [4] CERAME-UNIE (HRSG.) PAVING THE WAY TO 2050. THE CERAMIC INDUSTRY ROADMAP . BRUSSEL, 2012. URL [HTTP://WWW.CERAMEUNIE.EU/EN/NEWS/EUROPEAN-CERAMIC-INDUSTRY-LAUNCHES-2050-ROADMAP-PAVING-THE-WAY-TO-A-BETTER-FUTURE](http://www.cerameunie.eu/en/news/european-ceramic-industry-launches-2050-roadmap-paving-the-way-to-a-better-future) 23.1.2013
- [5] RÖDEL, J. WEISSENBERGER-EIBL, M.; KOUNGA, A.; KOCH, D.J.; BIERWISCH, A.; ROSSNER, W.; HOFFMANN, M.J.; SCHNEIDER, G.: HOCHLEISTUNGSKERAMIK 2025. STRATEGIEINITIATIVE FÜR DIE KERAMIKFORSCHUNG IN DEUTSCHLAND DES KOORDINIERUNGS-AUS-SCHUSSES HOCHLEISTUNGSKERAMIK DER DKG UND DGK. FRANKFURT, 2008. – ISBN 978-3-88355-364-1
- [6] DECHEMA, DBG, DGM, GDCH, VCI (HRSG.), : CHEMIE ALS INNOVATIONSTREIBER IN DER MATERIALFORSCHUNG : POSITIONSPAPIER. FRANKFURT/M., 2012. - ISBN 978-3-89746-140-6
- [7] ROOSEN, A., BARTUSCH, R., NEBELUNG, M., SCHARRER, K., WERR, U.: THESENPAPIER ZUR VORBEREITUNG EINER STRATEGISCHEN ROADMAP FÜR DIE KERAMISCHE VERFAHRENS-TECHNIK „DKG-FACHAUSSCHUSS „VERFAHRENSTECHNIK“. 2007. CFI/BERICHTE DER DKG 84, 3, S. D1-D6 (TEIL 1), 84, 4, S. D1-D3 (TEIL 2), 84, 5, S. D1-D11 (TEIL3)
- [8] BRIGGS, J. (2012) ENGINEERING CERAMICS IN EUROPE AND THE USA. ENCERAM UK
- [9] ADVANCED CERAMIC, A GLOBAL STRATEGIC BUSINESS REPORT, GLOBAL INDUSTRY ANA-LYSTS, INC., OCTOBER 2012
- [10] PRESSEINFORMATION VERBAND DER KERAMISCHEN INDUSTRIE E. V., 16. MAI 2013
- [11] [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/FR4#LEITERPLATTEN-BASIS-MATERIAL](http://de.wikipedia.org/wiki/FR4#LEITERPLATTEN-BASIS-MATERIAL)



ISBN 978-3-00-045777-7