

Poröse Keramiken: Herstellung – Eigenschaften – Anwendungen

U. Werr

Poröse Keramiken bieten ein breites Feld an Eigenschaften, die verschiedenste Anwendungen ermöglichen. Durch Auswahl des für die spezifische Anwendung geeigneten Grundwerkstoffes und Anpassung der Gesamtporosität, der Porengrößenverteilung und Porenform können vielfältige Einsatzzwecke bedient werden. Dies erfordert im Regelfall eine enge Abstimmung zwischen dem Keramikhersteller und dem Kunden oder Anwender.

Herstellung poröser Keramiken

Für die Herstellung poröser Keramiken können je nach Anforderungsprofil und Werkstoff verschiedene Prozessrouten verwendet werden:

- Einsatz von Platzhaltern
- Nutzung von Ausfallkörnungen
- Angepasster Sinterprozess
- Abformen von Trägerstrukturen
- Umwandlungsverfahren.

Im Folgenden wird nur auf die drei ersten Verfahren eingegangen, da nur diese für die beschriebenen Anwendungen von Bedeutung sind.

Ulrich Werr
Rauschert Heinersdorf-Pressig GmbH
96332 Pressig

E-Mail: u.werr@prg.rauschert.de
www.rauschert.com

Keywords: poröse Keramik, Drossel-
element, Keramik-Docht, Keramik-
Diaphragma, Brechkeramik

Das Abformen von Trägerstrukturen, beispielsweise von Kunststoffschäumen [1] wird z. B. bei der Herstellung von Gießfiltern großtechnisch eingesetzt. Die Umwandlungsverfahren basieren z. B. auf der Keramisierung von zuvor pyrolysierten Holzstrukturen, Papierstrukturen etc. mit metallischem Silizium zu SiC und befinden sich zurzeit noch im Forschungsmaßstab.

Es können je nach Erfordernis auch verschiedene Verfahren miteinander kombiniert werden, um die Eigenschaften poröser Keramiken noch gezielter einzustellen [2]. Platzhaltermaterialien (manchmal auch als Porosierungsmittel bezeichnet) werden bei der Aufbereitung der Rohstoffe in die keramische Matrix eingebracht und bei der Temperaturbehandlung entfernt [3–5]. Es kann sich dabei um rückstandsfrei (oder zumindest rückstandsarm) verbrennbare feste Stoffe handeln wie z. B. Kunststoffgranulate, Holzmehl, Kunstfasern, Styroporkugeln, Cellulosederivate etc., aber auch z. B. um Luft oder andere Gase (Schaumkeramiken) [6–7]. Beim zuletzt genannten Verfahren werden die Gase in flüssiger Phase des Werkstoffes (Werkstoff liegt als Suspension, Schlicker vor) eingebracht, der dann verfestigt wird, wobei die Gase eingeschlossen werden.

Die Größe und Form der Platzhalter bestimmt dabei die Form und Größe der Poren. Je nach Formgebungsverfahren erfolgt bei länglichen Porosierungsmitteln auch eine Ausrichtung in einer Vorzugsrichtung (z. B. bei Formgebung durch Extrusion in Extrusionsrichtung, bei Pressformgebung eher vorzugsweise quer zur Verdichtungsrichtung). Damit können anisotrope Werkstoffeigenschaften eingestellt werden. Beim Entfernen der Platzhalter durch thermische Verfahren sind oft besondere Vorkehrungen zum Umweltschutz (z. B. thermische Nachverbrennung) einzuhalten.

Als weitere Option zur Herstellung poröser Keramiken bietet sich der Einsatz gezielter Körnungsverteilungen an. Meistens besitzen keramische Rohstoffe eine relativ breite

Korngrößenverteilung. Diese erlauben eine hohe Gründichte und begünstigen auch das Dichtsintern im Brand. Wird nun ein Teilbereich der Körnung entfernt oder eine enge aber relativ grobe Einkornverteilung benutzt, so wird die Packungsdichte in der Formgebung verringert und es entstehen Zwickel zwischen den Körnern (Bild 1).

Die entstehenden Zwickel werden beim Sintern nicht mehr geschlossen, da sie zu groß sind. Durch Einstellung der Korngrößenverteilung kann die Porengröße gezielt beeinflusst werden [8].

Beim Sintern keramischer Werkstoffe durchlaufen die Werkstoffe eine Verdichtungskurve. Im Laufe des Brandes kommt es zunächst zur Bildung erster Brücken zwischen den Körnern (Sinterhalsen), dann zu einer zunehmenden Verdichtung und Schrumpfung des Werkstücks, bis die Enddichte erreicht ist. Beim Schrumpfen innerhalb des Sinterprozesses werden die Poren durch Transportvorgänge und Kornwachstum eliminiert (Bild 2) [9]. Wird nun der Sinterprozess in einer frühen Phase abgebrochen, so lässt sich auf diese Weise ebenfalls eine definierte Porosität einstellen [2, 10]. Zu beachten ist, dass der Sinterprozess in einer Phase unterbrochen wird, in der nur eine geringe Verdichtung erfolgt (Bereich einer kleinen Schwindungsrate), da sonst die Porosität kaum reproduzierbar hergestellt werden kann.

Eigenschaften poröser Keramiken

Poröse keramische Werkstoffe sind zumindest zweiphasige Werkstoffe, die aus der keramischen (festen) Phase sowie der meist gasgefüllten Porenphase bestehen. Die Gasfüllung der Poren passt sich dabei meist an die Umgebung an, da ein Gasaustausch mit der Umgebung durch Porenkanäle möglich ist. Geschlossene Poren können eine Gaszusammensetzung unabhängig von der Umgebung besitzen. Der keramische (Matrix-)Werkstoff kann entweder einphasig sein, ist aber oft mehrphasig (z. B. eine oder mehrere Kristallphasen und Glasphase).

Bei der Angabe der Porosität ist zwischen offener (von außen zugänglicher) und geschlossener Porosität zu unterscheiden. Die offene Porosität lässt sich dann noch in offene Sackporen und offene Porenkanäle unterteilen (Bild 3).

Je nach Anwendungsfall kann mehr offene Porosität gewünscht sein (z. B. wenn ein Filterelement gut durchströmbar sein soll) oder eher geschlossene Porosität (z. B. als thermischer Isolator). Die Summe aus offener und geschlossener Porosität wird als Gesamtporosität bezeichnet. Ist der Anteil an Porosität an einem Werkstoff eher klein, so dominiert die geschlossene Porosität, steigt der Anteil an Porosität, so wächst der Anteil an offener Porosität. Die Literaturlage von Untersuchungen an zahlreichen Werkstoffen (UN, poröse Metalle, ZrO₂, Graphitschaum, MgO-Granulate, Edelstahl und UO₂) wurden durch Schulz [11] zusammengefasst.

Neben der Angabe der Art und des Anteils an Porosität ist auch die Beschreibung der Porengrößenverteilung des Anteils an offener Porosität zur Beschreibung poröser Werkstoffe wichtig (Bild 4). Die Bestimmung der Porengrößenverteilung erfolgt meist mittels Quecksilberdruckporosimetrie. Die Porengrößenverteilung der geschlossenen Porosität ist diesem Verfahren nicht zugänglich, diese muss z. B. mittels optischer Verfahren an Anschliffen erfolgen. Einige Eigenschaften des Matrix-Werkstoffes werden durch die Porosierung nicht beeinflusst und gelten daher auch für den porosierten Werkstoff (z. B. Wärmeausdehnungskoeffizient), die meisten Eigenschaften werden aber in Abhängigkeit von der Gesamtporosität beeinflusst und müssen daher für den porösen Werkstoff neu bestimmt werden (z. B. Festigkeit, elektrische Eigenschaften, etc.).

Anwendungen

Die Anwendungsfelder und Ausführungsformen poröser Keramiken sind mannigfaltig (Bild 5). So wird von Anwendungen für Gas- und Flüssigkeitsfiltration, Katalysatorträger, thermische Isolatoren, Brennhilfsmittel, biomedizinische Anwendungen und vieles andere mehr berichtet. Es wurde bereits im Detail die Anwendung poröser Keramiken in der Filtration [13] sowie bei Wabenkörpern [14] beschrieben. Im Folgenden wird über einige realisierte Projekte berichtet, in de-

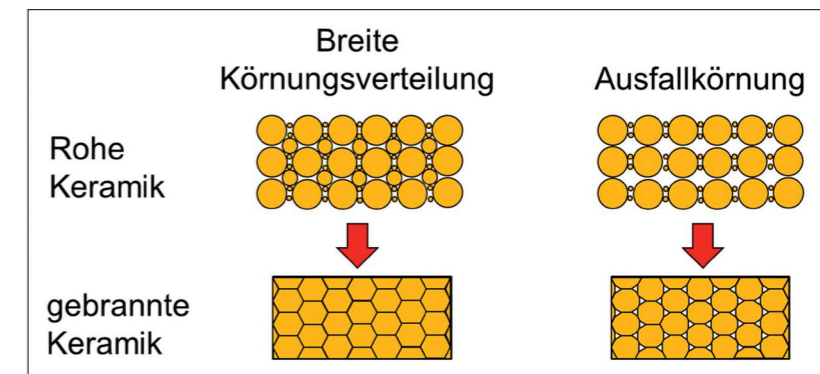


Bild 1 Schematische Darstellung des Sinterns mit angepasster Körnungsverteilung. Der übliche Weg zum Herstellen dichter Keramiken ist links dargestellt, rechts ein Beispiel, wie gezielt Porosität durch Anpassung der Korngrößenverteilung hergestellt werden kann

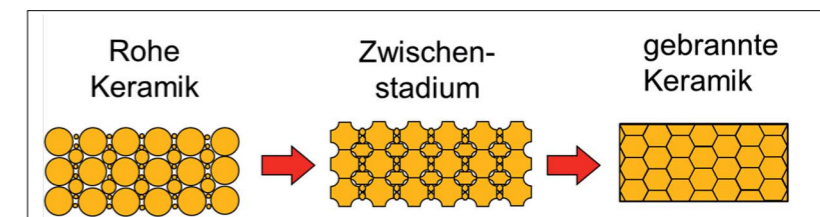


Bild 2 Schematische Darstellung des Sinterverlaufs bei Keramiken. Zur Herstellung poröser Keramiken wird der Sintervorgang im Zwischenstadium definiert abgebrochen

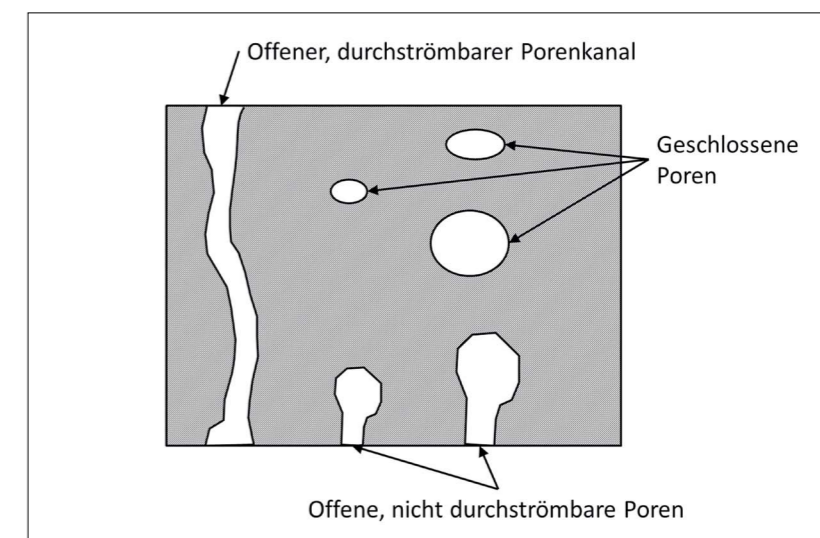


Bild 3 Schematische Darstellung von Poren

nen poröse Keramiken eine entscheidende Rolle spielen. Dabei wird auch auf das teilweise sehr komplexe Anforderungsprofil der Anwendung eingegangen und wie dieses mit einer porösen Keramik erfüllt werden konnte.

Drossелеlement für ein Blinklicht

Aufgabenstellung war die Nachentwicklung eines porösen keramischen Drossellements, dass in Quecksilber-Relais der

Fa. Siemens zur Steuerung des Taktes von Blinklichtern an Bahnübergängen eingesetzt wurde (Bild 6). Das beschriebene Blinkrelais ist in Deutschland noch vereinzelt in Altanlagen im Einsatz, wird aber in Indien immer noch als Standard eingesetzt, da es sich um einen sehr robusten zuverlässigen Aufbau mit langer Lebensdauer handelt (es sollen nach unbestätigten Angaben solche Relais schon seit mehr als 50 Jahren im Einsatz sein). Zu dem kann es in weiten

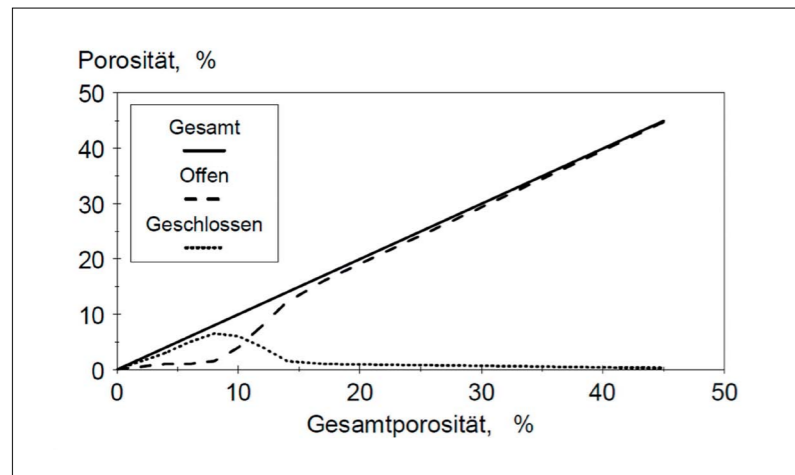


Bild 4 Typische Anteile von offener und geschlossener Porosität an der Gesamtporosität [12]



Bild 5 Typische Produkte aus poröser Keramik



Bild 6 Quecksilberrelais für Bahnblinkanlagen, poröse Keramik eingekreist (Gesamthöhe ca. 20 cm)

Temperaturbereichen eingesetzt werden (der Erstarrungspunkt von Quecksilber liegt $<-35\text{ °C}$, der Siedepunkt $>350\text{ °C}$) und ist auch insektensicher – manche Kunststoffe werden von aggressiven Insekten angegriffen und zerstört. Da das Quecksilber in einem geschlossenen System eingesetzt ist, besteht bei ordnungsgemäßer Handhabung auch keine Gesundheitsgefährdung. Das komplette Relais ist eine komplexe Glasbläserarbeit, in die eine Heizung, Schaltkontakte und die poröse Keramik kombiniert werden.

Das Funktionsprinzip ist wie folgt: Bei Anlegen einer Spannung wird über einen Schaltkontakt die Heizung eingeschaltet. Diese erwärmt sehr rasch das Gas im Gasraum 1 und verdrängt damit die Quecksilbersäule vom Schaltkontakt 1. Damit wird die Heizung ausgeschaltet, gleichzeitig das Blinklicht eingeschaltet. Durch die poröse Keramik findet ein Druckausgleich zwischen Gasraum 1 und Gasraum 2 statt, wodurch die Quecksilbersäule wieder zurückschwappet. Dabei wird das Blinklicht wieder ausgeschaltet, die Heizung wieder eingeschaltet. Dies erfolgt in einer Taktfolge von ca. 1 s.

Die Einstellung der Taktfrequenz erfolgt durch die Einstellung der Durchströmbarkeit der porösen Keramik. Ein Video des laufenden Blinkrelais ist im Internet bei Youtube unter dem Stichwort „RB 109“ zu finden. Das Know-how zur Herstellung der Keramik ist beim früheren Hersteller nicht mehr vorhanden, da die Fertigung dieser Keramik in den 1970er Jahren eingestellt wurde, Aufzeichnungen bei diversen Firmenübernahmen etc. verloren gegangen sind und die

Know-how-Träger nicht mehr greifbar waren. Das Blinkrelais wird seit Jahren von der Fa. Hermetiko GmbH nach den alten Vorgaben hergestellt. Bis 2011 wurden alle Aufträge aus noch vorhandenen Lagerbeständen der Keramik aus Altproduktion bedient. Aus dem Aufbau des Relais als Glasrelais ergab sich folgendes Anforderungsprofil an die Keramik:

- WAK (Wärmeausdehnungskoeffizient) der Keramik muss an den Glaswerkstoff angepasst sein, sonst kommt es zur Rissbildung im Glas (WAK Keramik $<$ WAK Glas) oder es bildet sich eine Leckage zwischen Keramik und Glas oder die Keramik löst sich aus dem Glas (WAK Keramik $>$ WAK Glas).
- Die Keramik darf beim Einschmelzen ins Glas nicht ausgasen, da sich sonst Gasblasen am Übergang Keramik-Glas bilden, die ebenfalls eine Leckage bilden und damit keine reproduzierbare Blinkfrequenz erzeugen.
- Die Keramik muss eine exzellente TWB (Temperaturwechselbeständigkeit) besitzen, denn beim Einschmelzen wird der Keramikstift schlagartig mit einer über 1000 °C heißen Gasflamme beaufschlagt.
- Weiterhin muss der Keramikstift mechanisch stabil sein, was bei der erforderlichen großen Porosität eine große Herausforderung darstellt.
- Die Durchströmbarkeit muss nach den Vorgaben einstellbar sein, um die Blinkfrequenz exakt einstellen zu können.
- Die Länge des Stiftes soll bei einem Soll-Durchmesser von 8–12 mm mindestens 75 % des Durchmessers betragen, da sonst der Stift bei Einschmelzen ins Glasrohr verkippen könnte. Die Lösung wurde daher schon im Frühstadium verworfen. Der Durchmesser an sich ist weniger kritisch, sollte aber im Bereich 8–12 mm liegen.

In mehreren Iterationsschritten mit Versuchsfertigungen an Keramiken, Einbau und Test bei der Fa. Hermetiko GmbH wurde nach mehr als einjähriger Zusammenarbeit eine funktionierende Keramik geliefert und für erste Serienlieferungen der Blinkrelais erfolgreich eingesetzt.

Die Lösung konnte in Stiften auf Basis Magnesiumsilikat gefunden werden, die eine extrem hohe offene Porosität von $>50\%$ aufweisen. Dabei ist die mechanische

Festigkeit deutlich höher als die des alten Siemens-Werkstoffes.

Die große Porosität konnte durch eine Kombination von Sinterprozess und Platzhaltern erreicht werden; zusätzlich wurden gezielt Poren mit $20\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser und mehreren Millimetern Länge in Längsrichtung eingebracht (Bild 7).

Dochte zur Verdampfung von Flüssigkeiten

Zur gezielten konstanten Verdampfung von Flüssigkeiten in technischen Prozessen und Haushalten (Insektizide oder zur Raumluftverbesserung) werden Dochte eingesetzt. Für einige Anwendungen werden keramische Dochte bevorzugt. Dabei ragen die Dochte in ein Flüssigkeitsreservoir hinein und saugen sich durch die Kapillarkräfte mit der Flüssigkeit voll. Diese steigt im Docht auf und wird auf der Oberfläche des Dochtes, oft unterstützt durch ein kleines Heizelement, verdampft. An die Dochte werden dabei folgende Anforderungen gestellt:

- Meist runde Stäbe mit einem Außendurchmesser typischerweise im Bereich 5–8 mm bei einer Länge zwischen 60–80 mm. Dies ist die typische Größe von Dochten, wie sie in Vorratsflaschen mit Flüssigkeit für 30–60 Tage eingesetzt wird.
- An die zu verdampfende Flüssigkeit einstellbare Kapillarität/Verdampfungsrate. Für jedes Trägerliquid muss die Kompatibilität zwischen Dichtmaterial und zu verdampfender Flüssigkeit neu eingestellt werden.
- Chemisch inert gegen die verwendeten Flüssigkeiten, da oft organische Medien verdampft werden.
- Kein Verblocken durch Verdampfungsrückstände im Langzeitbetrieb (bis mehrere Wochen).
- Mechanisch stabil (3-Punkt-Biegefestigkeit $>8\text{ MPa}$), so dass die Montage gewährleistet ist, der Docht aber auch nicht durch zufälliges Berühren beim Einsetzen in den Verdampfer durch den Verbraucher selbst zerstört wird.

Gelöst wurde dieses Anforderungsprofil durch die Werkstoffe Rapor P0,3 und Rapor P1 (Materialbasis Magnesiumsilikat), für Sonderanwendungen kommt auch Rapor P20 (Basis Al_2O_3) zum Einsatz. Durch Variation des Sinterprozesses kann bei Rapor P0,3 und Rapor P1 die Kapillarität eingestellt

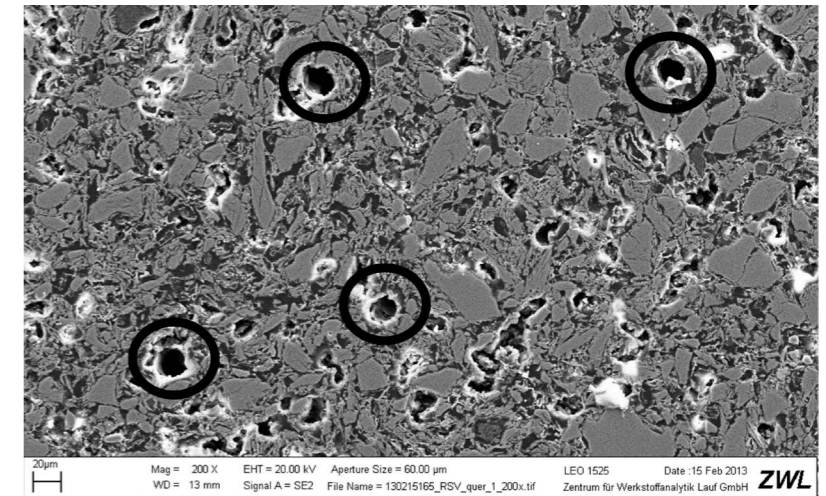


Bild 7 Anschluss poröser Keramik als Drosselelement in einem Quecksilberrelais. Markiert sind Längsporen mit einem Durchmesser von ca. $20\text{ }\mu\text{m}$

werden. Dargestellt ist die Zeit, die benötigt wird, bis sich ein Standarddocht 7 mm Durchmesser/72 mm lang vollständig mit Wasser vollgesogen hat, wenn er 20 mm tief in Wasser steht. Dies ist proportional zur Verdampfungsrate einer wasserbasierten Flüssigkeit, z. B. eines Insektizids. Die mechanische Festigkeit ist mit $>5\text{ MPa}$ (typisch 20 MPa) für diese Anwendungen mehr als ausreichend (min. 8 MPa sind gefordert).

Diaphragma für Analytik

Zur Herstellung von sogenannten Einstabmessketten zur Bestimmung des pH-Wertes oder des Redox-Potentials in Flüssigkeiten werden poröse Diaphragmen aus Keramik benötigt, die den Stromkreis zwischen Referenzelektrode und zu messender Flüssigkeit schließen. Hier konkurriert Keramik mit Schliiffdiaphragmen, Platinschwämmen und porösen Kunststoffen.

An das Keramikdiaphragma ergeben sich folgende Anforderungen:

- Der Durchmesser des Stäbchens liegt im Bereich 1,0–1,2 mm.
- Die Länge des Stäbchens ist kaum relevant, da nur ein kurzer Abschnitt in Glas eingeschmolzen wird, der Überstand wird abgebrochen und für die nächste Messkette verwendet.
- Die Porosität und Porengröße muss so eingestellt werden, dass ein geringer, aber definierter Ausfluss des Elektrolyten durch das Diaphragma nach außen erfolgen kann, sonst kann der Elektrolyt sich in der Zusammensetzung verändern, was zu Fehlmessungen führt.

Die Keramik darf beim Einschmelzen ins Glas nicht ausgasen, da sich sonst Gasblasen am Übergang Keramik-Glas bilden, die eine zu große Leckage darstellen.

Der WAK des Keramikstiftes soll in gewissen Grenzen einstellbar sein, um verschiedene eingesetzte Gläser verarbeiten zu können. Dabei darf es aber auch nicht zur Rissbildung im Glas oder einer ungenügenden Haftung der Keramik in Glas kommen (siehe oben).

Eine gute chemische Beständigkeit des Werkstoffes erlaubt auch den Einsatz in starken Säuren und Basen.

Da beim Einschmelzen ins Glas die Keramik kurzfristig mit einer Gasflamme beaufschlagt wird, muss die TWB auch hier gut sein. Auf Grund des kleinen Durchmessers ist diese Anwendung weniger sensibel wie das im vorherigen Kapitel beschriebene Blinkrelais.

Für die beschriebenen Anwendungen bieten sich zwei Werkstoffoptionen an:

- 1) Rapor P0,3: Ein Werkstoff auf Basis Magnesiumsilikat, der sich gut für Anwendungen eignet, die keine hohen Anforderungen an die chemische Beständigkeit des Diaphragmas stellen. Dieser Werkstoff bietet zudem die Möglichkeit, den WAK innerhalb gewisser Grenzen einzustellen (Bild 8).

Mit der Anpassung des WAK ist systembedingt immer auch eine Veränderung der Porosität verbunden. Diese Änderungen sind aber in den Anwendungen nicht von Bedeutung. Die Einstellung des WAK erfolgt durch die Wärmebehandlung.

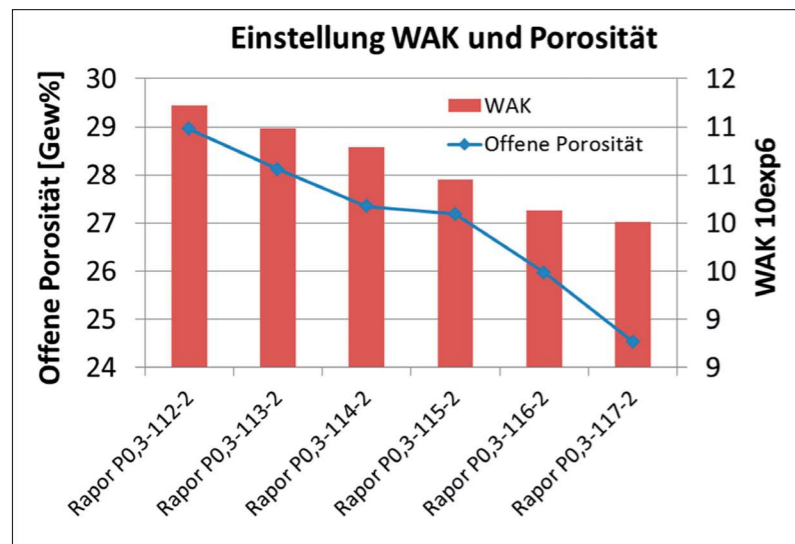


Bild 8 Einstellen des Wärmeausdehnungskoeffizienten und die davon abhängige offene Porosität bei Raport P0,3

2) Eine zweite Option ist ein Werkstoff auf Basis Y-FSZ. Dieser Werkstoff hat eine sehr viel bessere chemische Beständigkeit, hat jedoch den Nachteil, dass der WAK fest ist, die Gesamtporosität aber in Bereichen zwischen 20–45 % angepasst werden kann. Der Werkstoff wird durch die Anpassung der Porosität auf die Anwendung hin maßgeschneidert.

Poröse Brechkeramik für Heizelemente und Mantelthermoelemente

Für die Herstellung von Brechkeramiken, wie sie für die Herstellung von Mantelthermoelementen und hochverdichteten Heiz-

elementen eingesetzt wird, werden bewusst porös eingestellte Keramiken auf Basis von MgO und Steatit C230 eingesetzt. Damit wird die Festigkeit der Werkstoffe soweit heruntergesetzt, dass die Keramikbauteile im Verdichtungsprozess des Herstellers von Heizelementen bzw. Mantelthermoelementen wieder zu Pulver zerkleinert werden können. Typische Geometrien solcher Brechkeramiken sind im Bild 9 zu sehen. Zur Herstellung von Heizelementen werden sogenannte Wickelkörper durch Extrudieren hergestellt, anschließend getrocknet und gebrannt.

Beim Herstellen der Heizelemente wird auf den Wickelkörper außen eine sehr feine Heizwendel gewickelt, durch deren Anordnung (Wicklungsabstand) auf dem Wickelkörper eine anwendungsspezifische Leistungsverteilung über die Länge des Heizelementes eingestellt werden kann. Durch die Bohrungen in der Mitte werden dickere Drähte als Anschlusselemente nach außen geführt, an die die feinste Heizwendel angeschlossen wird. Anschließend werden die Wickelkörper in einem metallischen Hüllrohr durch Spacer (Bild 9 in der Mitte vorne) oder dünnwandige Hüllrohre (in Bild 9 links) zentriert. Zwischenräume werden mit rieselfähigem MgO-Pulver verfüllt. Anschließend wird das metallische Hüllrohr durch einen Hämmer- oder Rundknetprozess um 10 – 20 % im Außendurchmesser verringert. Dabei werden die Keramikbauteile bis auf die Primärkorngröße zerkleinert und betten dann die Heizwendel und die



Bild 9 Typische Brechkeramiken auf Basis von MgO, kleinster Außendurchmesser in der Abbildung ist 1,7 mm, die größten Rohre haben einen Außendurchmesser von 25 mm

Anschlussdrähte fest ein. Durch die kompakte Keramik wird eine gute elektrische Isolation zwischen den Heizwendeln und den Anschlussdrähten sowie nach außen zum metallischen Mantel sichergestellt. Gleichzeitig wird eine gute Wärmeleitung nach außen gewährleistet, da das Material hochverdichtet ist. Daneben sind noch weitere Varianten an Bauformen möglich, auf die aber hier aus Platzgründen nicht weiter eingegangen werden soll.

Zur Herstellung von Mantelthermoelementen werden in die Bohrungen von größeren MgO-Rohren (typische Außendurchmesser zwischen 15 – 25 mm) Drähte aus den Thermoelement-Materialien gefädelt. Darüber wird ein Hüllrohr aus dem gewünschten Mantelmaterial geschoben und an den Enden hermetisch verschlossen. Das Verdichten erfolgt dann meistens über einen Ziehprozess ähnlich der Drahtherstellung. Durch die Verringerung des Außendurchmessers erfolgt ein Auslängen des Materials. Bereits beim ersten Verdichtungsschritt wird das MgO-Rohr zu Pulver der Primärkorngröße zerkleinert, das den Abstand der Thermopaare untereinander und zum Mantel hin sicherstellt. Nach ein bis zwei Ziehritten muss der Mantel in einem Glühprozess wieder weichgeglüht werden, um die durch die Umformarbeit eingetretene Versprödung und die Härtung des Mantelmaterials aufzuheben.

An solche Keramiken ergeben sich folgende Anforderungen:

- Der Durchmesser der Bauteile liegt zwischen 1,3 – 40 mm, wobei es vielfältige Lochgeometrien (Lochdurchmesser, Lochabstände) geben kann. Bauteillängen zwischen 2 mm und max. 1000 mm, typischerweise max. 500 mm.
- Die Porosität muss so eingestellt werden, dass ein definierter artikelspezifischer Festigkeitsbereich eingehalten wird. Sind die Teile zu weich, zerbrechen sie in der Montage beim Hersteller der Heiz- und Mantelthermoelemente, sind sie zu hart, so ist die Verdichtung unvollständig oder ungleichmäßig.
- Die Zusammensetzung der Keramik muss so gewählt werden, dass keine typischen „Gifte“ für Heizleitermaterialien oder Thermoelementpaare enthalten sind.
- Für Mantelthermoelemente ist sicherzustellen, dass kein Überkorn enthalten ist, da dieses die Adern der Thermopaare oder den Mantel zerstören kann.

Für dieses Anforderungsprofil ergeben sich zwei Lösungsvarianten an Werkstoffen: Für Anwendungstemperaturen bei Heizelementen bis ca. 500 °C und kleineren und mittleren Leistungen kann poröser Steatit C230 eine gute Lösung bieten. Für höhere Temperaturen und Leistungsdichten wird auf MgO auf Basis von Schmelzmagnesia zurückgegriffen. Für Mantelthermoelemente wird meist MgO, sehr selten für Sonderanwendungen auch Al₂O₃ oder Spinell verwendet. Die Einstellung der geforderten Festigkeitsbereiche erfolgt im Brennprozess, in dem unvermeidliche Chargenschwankungen der Rohstoffe kompensiert werden. Durch sorgfältige Rohstoffauswahl und Analysen wird sichergestellt, dass keine schädlichen Verunreinigungen im Werkstoff enthalten sind. Mehrfache Siebprozesse stellen sicher, dass Überkörner sicher entfernt werden.

Zusammenfassung

Poröse Keramiken lassen sich auf Basis vieler Werkstoffgruppen herstellen, einige wurden in den beschriebenen Beispielen aus der Praxisnähe besprochen. Es gibt aber neben den oben beschriebenen Werkstoffen weitere poröse Keramiken in der Produktion bei Rauschert: Magnesiumsilikat, Y-FSZ, Al₂O₃, TiO₂, MgO, Mullit, Cordierit, etc. Die Anpassung der genauen Werkstoffparameter, wie offene Porosität, Porengrö-

ßenverteilung und Porenform sowie zum Teil auch des WAK, muss in vielen Fällen in enger Abstimmung mit dem Kunden bzw. Anwender erfolgen. Der Grundwerkstoff muss auf das Anforderungsprofil hin maßgeschneidert angepasst werden. So lassen sich viele verblüffende Problemlösungen für Kundenanforderungen realisieren.

Literatur

[1] Adler, J.; Standke, G.: Schaumkeramik, ein „alter neuer“ Werkstoff. Proc. zur Werkstoffwoche 96, Stuttgart, 28.–31.05.1996, Symposium 6, Werkstoff- und Verfahrenstechnik, 367–372
 [2] Kalemias, A.; et al.: Mechanical characterization of highly porous beta-Si₃N₄ ceramics fabricated via partial sintering and starch addition. J. Europ. Ceram. Soc. **33** (2013) 1507–1515
 [3] Sarikaya, A.; Dogan F.: Effect of various pore-formers on the microstructural development of tape cast porous ceramics. Ceram. Int. **39** (2013) 403–413
 [4] Liu, R.P.; Wang, C.G.: Effect of mono-dispersed PMMA micro-balls as pore-forming agent on the properties of porous YSZ ceramics. J. Europ. Ceram. Soc. **39** (2013) 1859–1865.
 [5] Lee, S.J.; et. al.: Thermal cycle development of PMMA pore former removal for honeycomb-type SOFC-supports. Ceram. Int. **40** (2014) 4879–4887
 [6] Wu, H.B.; et. al.: Aqueous gelcasting and pressureless sintering of zirconium diboride foams. Ceram. Int. **40** (2014) 6325–6330

[7] Preiss, A.; et. al.: Tailored graded pore structure in zirconia toughened alumina ceramics using double cooling freeze-casting. J. Europ. Ceram. Soc. **32** (2012) 1575–1583
 [8] Kogan, A.: Development of porous ceramic membranes for a solar thermal water-splitting reactor. [Ed.] American Chemical Society. Preprint of Symposia. Division of Fuel Chemistry American Chemical Society **44** (1999) 859–863
 [9] Exner, H.E.: Sintern. In: Technische Keramik. Essen 1998, 28–33
 [10] Kocjan, A.; Shen, Z.: Colloidal processing and partial sintering of high-performance porous zirconia nanoceramic with hierarchical heterogeneities. J. Europ. Ceram. Soc. **33** (2013) 3165–3176
 [11] Schulz, B.: Thermal conductivity of porous and highly porous materials. High Temperatures – High Pressures. 7th Europ. Thermophysical Properties Conference Antwerp/Belgium, 1980, 649–660
 [12] Dröschel, M.: Grundlegende Untersuchungen zur Eignung poröser Keramiken als Verdampferbauteile. Dissertation Universität Karlsruhe (TH), Schriftenreihe des Instituts für Keramik im Maschinenbau, 1998
 [13] Duscher, S.: Ceramic membranes in chemical and pharmaceutical applications. CERAMIC APPLICATIONS **1** (2013) [1] 19–23
 [14] Duscher, S.: Ceramic honeycombs for thermal and process engineering. CERAMIC APPLICATIONS **2** (2014) [1] 34–39

Wer liefert was in der Keramik-Industrie?

Spezialisten suchen & finden

www.cfi.de **Ceramic Suppliers**