

der Zellstruktur von Holz und Schwamm viele Hinweise. Im Zusammenhang mit dem Vergleich der Eigenschaften [4] (Bild 2) auch natürlicher Werkstoffe kann der optimale Werkstoff für jeden Einsatzfall gefunden werden.

Poröse Werkstoffe sind dort genauso vertreten wie fasrige Werkstoffe. Die Thermochockbeständigkeit, aus dem thermischen Verhalten von E-Modul, Festigkeit und Ausdehnungskoeffizient berechnet [5], scheint bei einer Porosität von 5 % maximal zu sein. Die Weibull-Statistik ergibt für das Festigkeitsverhalten von Keramiken eine negative Abhängigkeit vom Volumen. So nimmt die Festigkeit s mit steigender Bauteilgröße V bei kleinem Weibullmodul m stark ab:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1/m}$$

Daraus leiten sich die für diese Forschungsarbeiten motivierenden Fragen ab: Steigt die Festigkeit mit abnehmendem Volumen, mit abnehmender Wandstärke und bei der Formänderung vom Kubus über das Plättchen zur Faser? Die Erfahrung zeigt, dass das richtig ist. Bedeutet das aber gleichzeitig auch, dass ein Schalenkörper mit Stützgewölbe eine höhere relative Festigkeit besitzt als ein Vollkörper?

2 Tiefziehbare Folien

Dreidimensional geformte Keramischalen können überall dort eingesetzt werden, wo Gewichtseinsparungen parallel gefordert sind mit Sterilisierbarkeit, Kratzfestigkeit, Glanz und Schönheit der Oberfläche. So ergeben sich z.B. Einsatzgebiete im mobilen Bereich wie bei Wohnmobilen und Flugzeugen. FEM-Simulationsrechnungen (Bild 3) an einer nur am Rand unterstützten Duschtasse ergeben bei einer Schalenstärke von 3 mm und einer Belastung

durch eine Masse von 100 kg eine maximale Zugspannung von ca. 75 MPa. Das bedeutet, dass die Duschtasse auch ohne Faserblock- oder Leichtbetonunterlage weit unterhalb der Festigkeit des Werkstoffs belastet wird und deswegen nicht brechen wird.

Mit Hilfe der Foliengießtechnik, die auch zur Herstellung von faserverstärkten SiC-Folien [6] verwendet wurde, konnten unter Verwendung geeigneter Plastifizierungsmittel und Binder tiefziehbar Folien hergestellt werden. Zwei Polymere (S und SW) [7] erwiesen sich als geeignet, wobei das Polymer S wesentlich höhere Verformungen zeigte. Bild 4 zeigt das Verhalten der Polymere nach der Verformung im Kugel-Ring-System. Sie wurden schließlich in den Keramikrezepturen verwendet. Nach dem Trocknen wurden die Keramikfolien mittels Kugel-Ring-, zwei Ringwellenscheiben oder einem Kleinwarmumformgerät verformt, entbindert und gesintert. Bild 5 zeigt bei verschiedenen Verformungslasten erzeugte ZrO₂-Folien im Zustand nach dem Sintern. Die Zusammenfassung dieser Ergebnisse in Bild 6 zeigt 100–120 % bleibende Verformung für die meisten Keramiken und 180 % für ZrO₂.

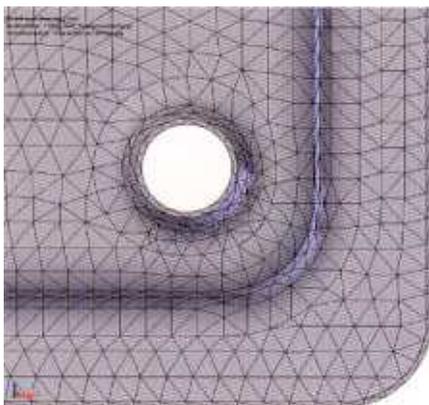


Bild 3 • FEM-Netz zur Simulationsrechnung



Bild 4 • Polymere S und SW nach Verformung

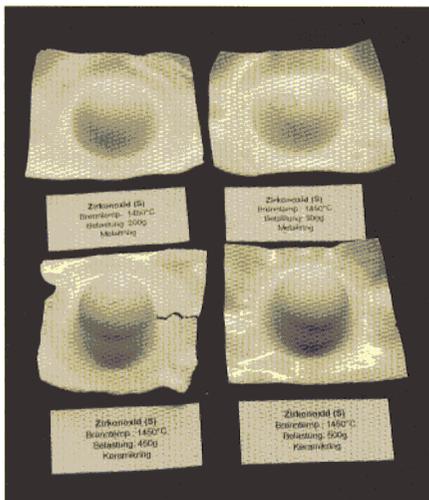


Bild 5 • Verformte ZrO₂-Folien bei verschiedenen Umformlasten nach dem Sintern

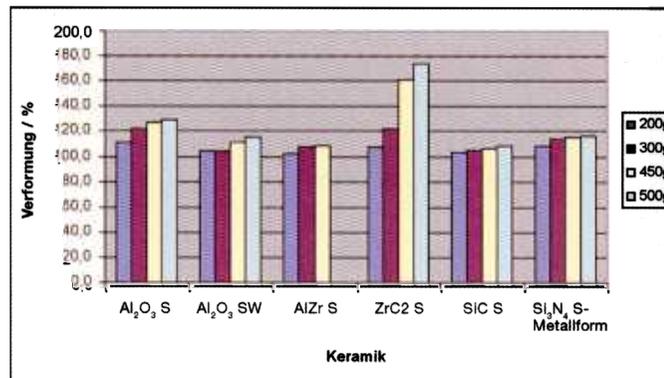


Bild 6 • Bleibende Verformungen der verschiedenen Keramiken nach dem Sintern

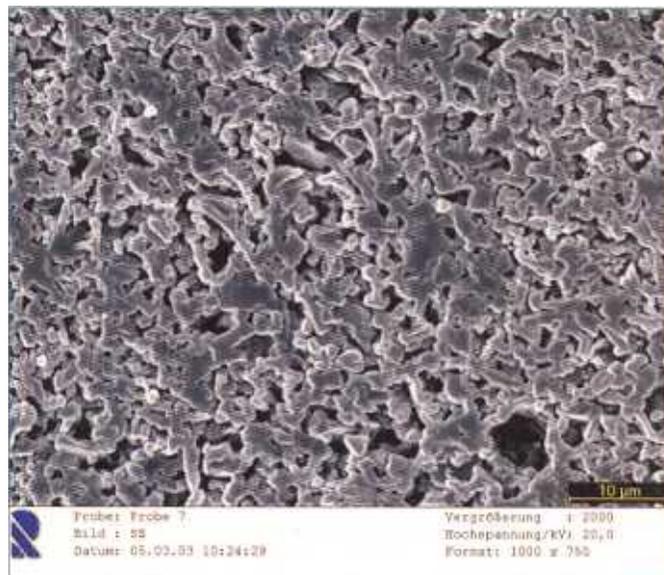


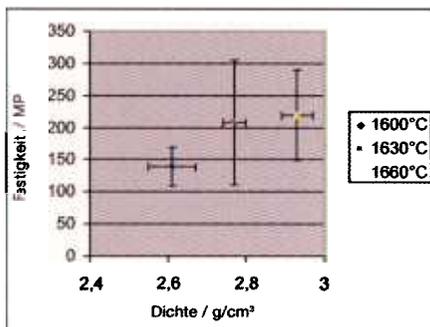
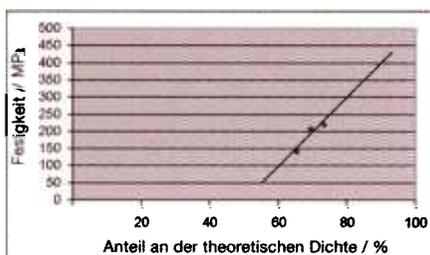
Bild 7 • Gefüge von Al₂O₃-SW nach 1630°C

2.1 Gefügecharakterisierung

Die Gefüge der gesinterten Al₂O₃-Folien – eines davon ist in Bild 7 zu sehen – zeigen eine zunehmend stärkere Konsolidierung mit steigender Sinteremperatur, abnehmenden Feinanteil und eine homogene enge Porenverteilung im µm-Bereich. Der verwendete Binder scheint keinen großen Einfluss auf das Gefüge zu haben.

2.2 Festigkeit

Die Festigkeit der Keramik wurde an Streifen im 4-Punkt-Biegeversuch gemessen. Die Streuung (Bild 8) ist recht groß, da die Streifen nach dem Sintern leicht gebogen oder tordiert waren und deswegen eine exakte Auflage nicht zustande kam.

Bild 8 • Festigkeit von Al₂O₃-SW nach dem SinternBild 9 Extrapolation der gemessenen Festigkeitswerte für Al₂O₃-SW

Die erreichten Sinterdichten lagen bei ZrO₂ bei 90 % und bei Al₂O₃ nur bis zu 75%.

Die bei Dichtsinterung zu extrapolierenden Festigkeitswerte (Bild 9) liegen bei 500 MPa, einem für diese Keramik normalen Wert.

Die erreichten Dichten sind für Anwendungen im Filtrationsbereich geeignet. Die Reproduzierbarkeit der Geometrie ist genauso wie die Dichte deutlich besserbar.

2.3 Stützstruktur mittels 3D-Druckens

Mit Hilfe von CAD-Programmen können nahezu beliebige Konstruktionen für innere Stützsysteme und Gewölbe erzeugt werden (Bild 10). Sie sind ein wesentliches Element für die Leichtkonstruktion. Die Verbindung beider Technologien – Folienguss mit Tiefzug und 3D-Drucken – erlaubt zudem Kombinationen ver-

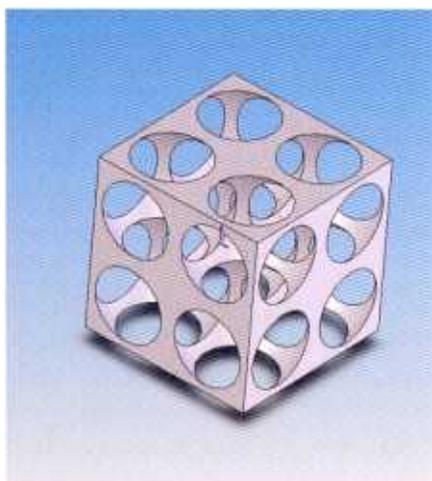


Bild 10 • Stützkörper mit 90 % Porosität

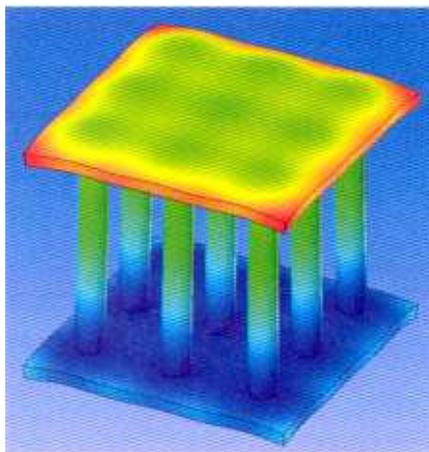


Bild 11 • Erwartete Deformationen

schiedener Werkstoffe für Schale und Stützsystem.

Schwerpunkt des laufenden Projekts [8] ist es, mit Keramikpulvern im 3D-Drucker direkt Bauteile wie diese Stützgewölbe herzustellen und deren Geometrieentwicklung während des Trocknens, Entbinderns und Sinterns zu verfolgen. Dies wird erreicht mit einem optischen Vermessungssystem, das mit der Streifenlicht-Projektion und zwei hochauflösenden Kameras arbeitet. Die Ergebnisse der Geometrieabweichungen (Bild 11) werden zurückgeführt in die Konstruktion, um als Sinterkörper die Geometrie zu erhalten, die gewünscht wurde.

2.4 Zusammenfassung und Ausblick

Keramische Rezepturen konnten so modifiziert werden, dass es möglich war, die hergestellten Folien in eine dreidimensionale Form zu bringen, ohne dass Risse oder sonstige Schäden an den Grünteilen entstanden. Nach dem Entformen wurden die 3D-Körper ohne Schaden getrocknet, entbindert und gebrannt. Es ergaben sich bis zu 180 % bleibende Verformungen nach dem Sintern. Auch die gemessenen Festigkeiten lagen unter Berücksichtigung der Porosität im normalen Bereich der Werkstoffe. Reproduzierbarkeit der Geometrie und Sinterdichte sind besserbar und Thema der weiteren Entwicklung. Die potentiellen Anwendungen der tiefgezogenen Folien sind im Flieg- oder Fliehbereich und im mobilen Bereich und in der Filtration zu sehen. Insbesondere auch dort, wo sterile, glatte und verschleißfeste Oberflächen benötigt werden. Zusammen mit der Möglichkeit, leicht Stützkonstruktionen mit dem 3D-Drucker zu realisieren, sind Leichtbauteile mit konstruierter und damit gezielt eingebrachter Porosität realisierbar.

Fortsetzung folgt

Danksagung

Wir danken dem BMBF und dem Projektträger AIF für die Förderung der Projekte „Anwendung des Tiefziehens auf keramische Folien“ Förderkennzeichen 1709201 und „Rapid Prototyping 3D-Drucken von keramischen Modellen und Bauteilen“ Förderkennzeichen 1711303.

Literatur

- [1] <http://mlu.mw.tu-dresden.de/module/m004/start/leichtbau.htm>
- [2] Schumacher, M., Bast, S., Grimm, A.: Schlussbericht zum BMBF-Projekt 1709201 „Anwendung des Tiefziehens auf keramische Folien“
- [3] <http://www.awi-bremerhaven.de//TT/leichtbau/index-d.html>, Dr. Christian Hamm
- [4] Ashby, M.F.: Materials Selection in Mechanical Design, Engineering Department. University of Cambridge, UK, Butterworth / Heinemann 1992 ISBN 0 7506 2727 1
- [5] Ondracek, G.: Microstructure-Thermochemical-Property Correlations of Two-Phase and Porous Materials. Materials Chemistry and Physics 15 (1986) 281–313
- [6] Kriegesmann, J., Schumacher M.: Herstellung und Festigkeitsverhalten von SiC-faserverstärktem rekristallisiertem SiC. Keram. Z. 55 (2003) [12]
- [7] Schumacher, M., Jonas, S., Fuß, R., Papenfuhs B.: Zusammensetzung für die Herstellung von keramischen Formkörpern, die aus der Zusammensetzung erhältlichen Grünlinge und keramischen Formkörper, Offenlegungsschrift DE 103 20 969 A1 vom 25.11.2004, Kuraray Specialities Europe GmbH, D-65926 Frankfurt am Main
- [8] Grimm, A., Tillmanns, R., Schumacher, M.: Rapid Prototyping von keramischen Bauteilen und Modellen, BMBF-Projekt 1711303, Zwischenbericht 2004

Eingegangen: 17.06.2005