

Simulation des Brennprozesses bei der Herstellung von Gebrauchskeramiken



Der Hauptautor Dr. Torsten Kraft studierte 1986–1992 Maschinenbau an der TU Darmstadt, 1992–1995 folgte dort die Promotion im Bereich der Materialwissenschaft. Er arbeitete von 1992–1997 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Darmstadt, im Fachbereich Materialwissenschaft, Fachgebiet Physikalische Metallkunde. 1997 war er Postdoktorand am Department of Materials Science and Engineering der University of Wisconsin at Madison (Madison, WI, USA). Seit 1998 ist Dr. Kraft wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg, seit Mitte 2001 Leiter des Leistungsbereichs Pulvertechnologie.

Prof. Dr. Hermann Riedel ist Leiter des Geschäftsfelds Simulation von Fertigungsschritten am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg.

Dr. Friedrich Raether ist Leiter der Abteilung Materialanalytik und Prozessoptimierung am Fraunhofer Institut für Silicatforschung, Würzburg.

Dipl.-Ing. Friedherz Becker ist Leiter des Riedhammer-Anwendungs-Centers bei der Riedhammer GmbH, Nürnberg.

T. Kraft, H. Riedel, F. Raether, F. Becker

Kurzfassung

Nach einer kurzen Darstellung der Grundlagen der Simulation von Sintervorgängen sowie der Bestimmung der Materialparameter wird auf die Simulation der Strömungsvorgänge in einem Ofen eingegangen. Dies ermöglicht neben wichtigen Hinweisen für die Auslegung von Öfen die Bestimmung der Randbedingungen (z. B. Wärmeübergang) für die Sintersimulation. Anschließend wird der Brennprozess bei der Herstellung von gepressten Tellern numerisch simuliert. Unter-

sucht wird, ob sich die Durchbiegung der Tellermitte sowie das Absinken der Tellerfahne mit ausreichender Genauigkeit vorhersagen lassen. Die erzielte Übereinstimmung ist für die Praxis ausreichend. Damit steht ein Hilfsmittel bereit, mit dem die Pressform so ausgelegt werden kann, dass der gebrannte Teller die gewünschte Form aufweist. Die beschriebene Methode kann auch auf andere Gebrauchskeramiken angewendet werden.

Abstract: Simulation of the Firing Process in the Production of Household Ceramics

Following a short description of the fundamental principles of sintering simulation as well as the determination of the material parameters, the simulation of the gas flow in a whole kiln is described. From this simulation, the boundary conditions (for example, heat transmission) for sintering simulation can be obtained as well as suggestions for the design of a new kiln. In the final part of the paper, firing isostatically pressed plates is numerically simulated. It was investigated whether the

deflection in the centre of the plate as well as the lowering of the rim could be simulated with sufficient accuracy. The achieved results are sufficient for practical applications. Thus, a simulation tool is now available with which the pressing tools can be so constructed that the fired plates achieve the desired shape. The method described can easily be applied to other household ceramics.

1 Einleitung

Die Formgebung gebrauchskeramischer Artikel erfolgt meist über kalisostatisches Pressen (z. B. für Teller, aber auch für Tassen und andere Hohlgefäße) oder über Schlickergießen (z. B. für Sanitärkeramik). Nach der Formgebung und eventuellen weiteren Herstellungsschritten werden die Teile gesintert, das heißt, sie werden bei hohen Temperaturen gebrannt.

Trotz der in den letzten Jahren erreichten erheblichen Fortschritte beim industriellen Glüh- und Glattbrand von gebrauchskeramischen Artikeln besteht weiterhin ein hohes Verbesserungspotential, dessen Umsetzung aber zunehmend mehr Entwicklungsaufwand erfordert. Auch werden die Anforderungen z. B. an die Maßhaltigkeit nach dem Brand immer höher. Beim Brand tritt vor allem bei größeren Teilen neben dem unvermeidlichen Sinterschwund auch eine Verformung aufgrund der Schwerkraft auf. Diese Verformung muss neben dem Aufmaß für den Sinterschwund in der Form vorgehalten werden, damit das gebrannte Produkt die gewünschte Form aufweist. Bei Tellern z. B. beobachtet man sowohl ein Absinken der Tellerfahne als auch des Bodens während des Brennens.

Die bisher überwiegend durchgeführte empirische Vorgehensweise ist nicht nur äußerst kostenintensiv, sondern führt zusätzlich zu oft deutlichen Überschreitungen der gegenüber dem Kunden genannten Liefertermine. Eine einigermaßen genaue Abschätzung des Zeitaufwands ist nur schwer möglich, da die Herstellung der Press- oder Schlickergussformen teuer und zeitaufwendig ist und der auftretende Verzug mit einfachen Mitteln kaum exakt vorhergesagt werden kann. Durch die möglichst genaue Modellierung der Vorgänge beim Brand kann u. a. der Verzug aufgrund von Schwerkrafteinflüssen vorhergesagt und damit der Zeitbedarf bei der Entwicklung neuer Formen reduziert werden, da die Formen schon im Rechner ausgelegt und optimiert werden können.

In diesem Artikel soll ein kurzer Überblick über die Grundlagen der Simulation des Brennprozesses gegeben werden.

Die Möglichkeiten der Simulation werden anschließend am Beispiel des Glattbrandes eines Tellers demonstriert. Die vorgestellte Methode wurde auch auf die Herstellung von schlickergegossenen Sanitärkeramiken mit Erfolg angewendet. Neben der hier vorgestellten Anwendung in der klassischen Keramik wurde die Simulation auch schon auf Bauteile der technischen Keramik sowie für weitere Werkstoffklassen angewendet (siehe z. B. [1–3]). Ein Überblick über den Stand der Simulation des Sinterns ist in [4–5] zu finden.

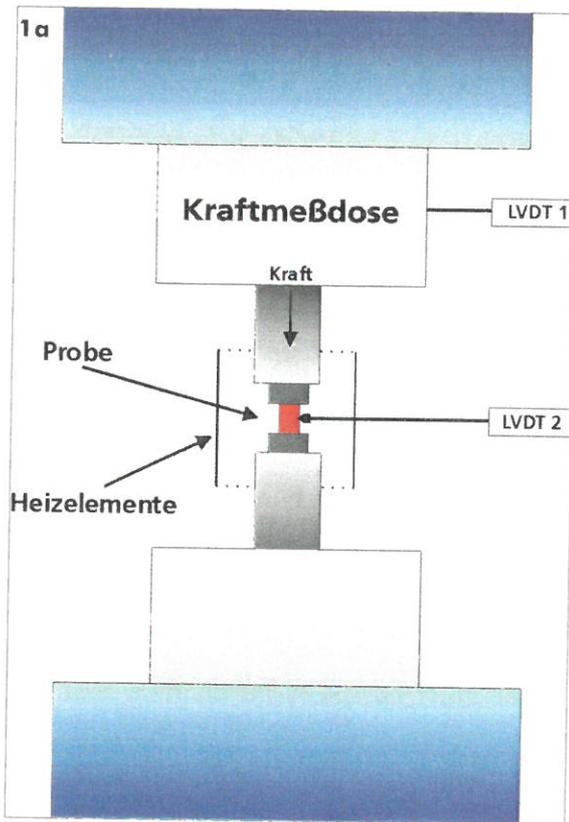
2 Theoretische Grundlagen der Simulation von Sinterprozessen

Bei Artikeln der Gebrauchskeramik, die meist durch isostatisches Pressen oder Schlicker- bzw. Druckgießen hergestellt werden, ist die Dichteverteilung im Grünkörper relativ homogen, so dass Sinterverzüge hauptsächlich durch Schwerkrafteinflüsse verursacht werden. (Bei durch Matrizenpressen hergestellten Bauteilen führt auch die kaum vermeidbare Dichteinhomogenität zur einem Sinterverzug.)

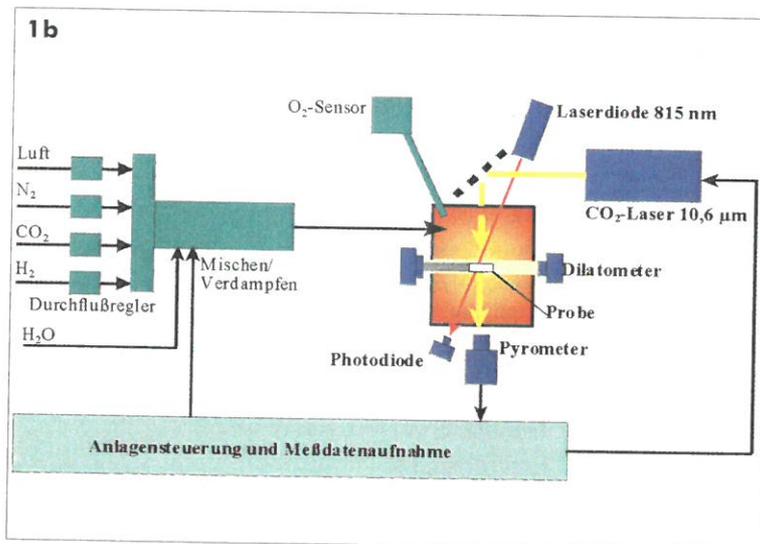
Nach der Formgebung folgt das Sintern, bei dem sich die Pulverteilchen fest verbinden. Dazu kommt bei vielen Werkstoffen ein starker Rückgang der Porosität, das heißt, ein Anstieg der Dichte bis oder fast bis zur vollen Dichte des Materials, und ein Anstieg der Festigkeit. Die treibende Kraft für das Sintern stammt von der Oberflächenenergie der Pulverteilchen. Die freie Oberfläche der Teilchen wird reduziert, wenn sich die Teilchen verbinden und wenn die Porosität abnimmt. Die sich stattdessen bildenden Korngrenzen haben eine niedrigere Energie. Die Korngrenzenergie treibt das Kornwachstum, welches im Allgemeinen das Sintern begleitet.

Es ist vorteilhaft, den Sintervorgang in drei Stadien zu unterteilen. Im ersten Stadium ordnen sich die Teilchen gegenüber dem Ausgangszustand um, so dass sie den Raum besser füllen. Zwischen benachbarten Teilchen bilden sich Sinterhalse. Die Teilchenform ist außerhalb des Einflussbereichs der Sinterhalse noch durch die Anfangsform der Teilchen gegeben. Im zweiten Stadium ist der Porenraum wie im ersten Stadium immer noch offen in dem Sinn, dass ein Gas

Bilder 1 a–b
Messprinzip zur
Bestimmung der
Modellparameter:
a) Sinter-
umformversuch,



b) Thermooptische
Messanlage (TOM)



durch den Körper strömen kann. Im Gegensatz zum ersten Stadium ist nun die Teilchen- oder Porenoberfläche aber nahezu eine Gleichgewichtsfläche minimaler Grenzflächenenergie. Das heißt, die Oberfläche hat eine konstante Krümmung. Solche Gleichgewichtsflächen können numerisch für verschiedene periodische Kornanordnungen berechnet werden. Bei fortschreitender Verdichtung schnüren sich die Porenkanäle zwischen den Kontaktflächen ab. Die resultierende geschlossene Porosität mit isolierten Poren ist für das dritte Sinterstadium charakteristisch.

Beim Festphasensintern wird als wichtigster Mechanismus für den Transport von Atomen aus Korngrenzen zu den Poren eine spannunggetriebene Korngrenzdiffusion angesehen. Als paralleler Pfad wird näherungsweise eine Volumendiffusion durch die Körner berücksichtigt. Oberflächendiffusion führt nicht direkt zur Verdichtung. Sie ist aber notwendig, damit die Materie über die Porenoberfläche verteilt wird. Die meisten Gebrauchskeramiken sintern mit flüssiger Phase. Beim Flüssigphasensintern werden die Verdichtungs-

beiträge durch Teilchenumordnung, die möglich werden, wenn sich eine Schmelze bildet, und durch den Auflösungs-Wiederausscheidungs-Mechanismus berücksichtigt. Dabei löst sich der hochschmelzende Basiswerkstoff an den Teilchenkontakten auf, weil dort als Folge der Kapillarspannung Druck auf den Feststoff ausgeübt wird. Die Feststoffatome diffundieren dann durch die Flüssigphasenfilme aus der Druckzone heraus und lagern sich außerhalb der Kontaktzone wieder auf der Kornoberfläche ab. Kornvergrößerung wird vom Modell ebenfalls beschrieben.

Die konstitutiven Gesetze der meisten Sintermodelle sind als linear viskose Gesetze formuliert, deren Parameter von Temperatur, Dichte und anderen Zustandsvariablen wie z. B. der Korngröße abhängen und theoretisch berechnet werden können. Details sind in zusammenfassender Form bei Riedel und Blug [6] für Festphasensintern, bei McHugh und Riedel [7] für Flüssigphasensintern zu finden (weitere Hinweise unter [8]). Die Modelle für die verschiedenen Sinterstadien wurden durch Interpolation zu einem einheitlichen Modell zusammengesetzt, welches alle Diffusionsmechanismen, Sinterstadien und die Kornvergrößerung durch einen Satz von Gleichungen beschreibt [6]. Diese komplexen Modelle wurden in das Finite-Element-Programm ABAQUS/Standard® als User Subroutine implementiert. Als Ergebnis der Simulation erhält man den Verzug nach dem Sintern sowie eventuell vorhandene, meist thermische Spannungen, die sich während des Brandes oder des Abkühlens einstellen können.

3 Bestimmung der Materialparameter

Zur Messung der Materialparameter wird der Sinterumformversuch verwendet. Bild 1 a zeigt den schematischen Aufbau des Versuchs. Eine zylindrische Probe wird während des Sinterns axial belastet. Die Kraftaufbringung erfolgt hydraulisch, pneumatisch oder durch Auflegen eines Gewichts. Die Probendimensionen (axial und radial) werden an der am Fraunhofer-IWM vorhandenen Anlage mit zwei Wegaufnehmern (LVDT) kontinuierlich erfasst. Am Fraunhofer-ISC steht eine Thermooptische Messanlage (TOM) [9] zur Verfügung, mit der die Dehnungen unter definierter Last und unter Vorgabe einer definierten Atmosphäre (Temperatur, Feuchte, Gaszusammensetzung) [10] durch optische Dilatometrie [11] gemessen werden können (Bild 1 b). Bei vielen Materialien wird der Sinterprozess durch die Ofenatmosphäre deutlich beeinflusst. Deshalb muss bei der Bestimmung der Materialparameter im Labor die gleiche Ofenatmosphäre eingestellt werden, wie sie im Produktionsofen vorliegt. Im vorliegenden Beispiel wurde die Ofenatmosphäre des gasbefeuerten kontinuierlichen Produktionsofens mit einer ZrO_2 -Sonde ausgemessen. Die fehlenden Gaskonzentrationen wurden rechnerisch ermittelt. Die so ermittelte Atmosphäre wies erwartungsgemäß einen sehr hohen Wasserdampfanteil von 17 Vol.-% auf. Im TOM-Ofen wurden Glattbrandversuche an glühgebrannten Porzellanscherben mit dieser Atmosphäre und – zum Vergleich – an trockener Luft durchgeführt. Die Sinterkurven unterschieden sich deutlich. In der feuchten Atmosphäre war die Sinterung um ca. 30 K zu tieferen Temperaturen verschoben [12].

Die Anpassung der Materialparameter des Sintermodells an die gemessenen axialen und radialen Dehnungen erfolgt, indem der Satz von Entwicklungsgleichungen für die Dehnungen und die Korngröße numerisch über die Zeit integriert werden. Die Modellparameter (das sind Diffusionskoeffizienten, Reaktionskonstanten, spezifische Oberflächenenergien, Korngrenzmobilität etc.) werden variiert, bis die gemessene Entwicklung der Dehnungen und der Korngröße vom Modell wiedergegeben werden. Die simulierten und

gemessenen Dehnungen sind im Bild 2 beispielhaft für eine zylindrischen Probe mit 16 mm Ø und einer Last von 50 N dargestellt. Als Material wurde ein Granulat der Firma Christian Seltmann GmbH, Weiden, verwendet. Die Dehnungen stimmen gut mit den experimentell ermittelten Werten überein.

Ein weiterer Materialparameter, der bei der Simulation der Temperaturverteilung im Brenngut wesentlich ist, ist die Wärmeleitung. Sie ändert sich mit der Temperatur und der Dichte. Die Wärmeleitung wird mit der Laser-Flash-Methode in situ während der Sinterung an der TOM (Bild 1 b) gemessen. Bild 3 zeigt die Temperaturleitfähigkeit während des Porzellanglattbrandes. Sie hängt kaum von der Aufheizrate ab. Mit der Sinterung nimmt sie zu, was die Temperaturgradienten im Scherben – bei konstanter Aufheizrate – verringert [12]. Mit der TOM-Anlage können optimale Temperatur-Zeit-Zyklen experimentell ermittelt werden [13]. Im vorliegenden Beispiel nahm der Verzug von Porzellanproben durch Anwendung eines optimierten Brennzyklus um 16 % ab.

4 Ofensimulation

Für eine möglichst realistische Simulation des Brennprozesses sind die instationären und räumlich inhomogenen thermischen Vorgänge im Ofen entscheidend. Die Brennkurve beeinflusst sowohl den Sinterfortschritt als auch das Entstehen von thermischen Spannungen im Brenngut. Deshalb ist die Brennkurve eine wichtige Eingangsgröße für die Simulation des Brandes eines einzelnen Artikels. Sie kann experimentell gemessen werden, was aber im Allgemeinen einen recht großen Aufwand bedeutet und meist nur für einige wenige Stellen durchgeführt wird. Durch Abschattungen kann die Temperatur der Oberfläche selbst bei einzelnen Artikeln lokal verschieden sein.

Die Simulation der thermischen Verhältnisse im gesamten Ofen unter Berücksichtigung der Beladung erlaubt die Bestimmung der lokalen Brennkurven an den Stellen, welche die unterschiedlichsten zeitlichen Verläufe aufweisen. Die Ähnlichkeit dieser Kurven bestimmt die Qualität nach dem Brand entscheidend mit. Sintersimulationen für diese „extremen“ Kurven können Hinweise auf den Einfluss der Ofeninhomogenität für Verzug oder maximale Spannungen im gebrannten Artikel geben.

Aber auch für die Auslegung neuer Öfen ist die Simulation inzwischen ein wichtiges Werkzeug geworden [14]. Mit ihr

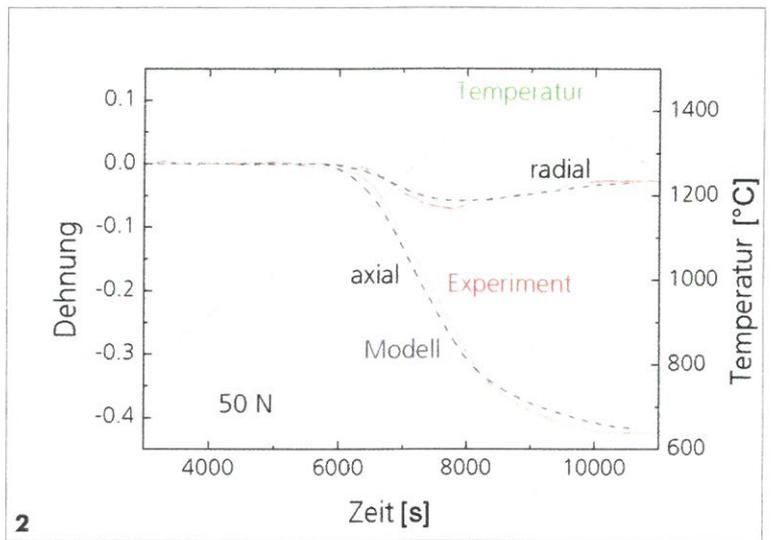


Bild 2 Vergleich der simulierten Dehnungen (blau) mit den Versuchen (rot) bei einer Last von 50 N. Die Brennkurve ist ebenfalls angegeben

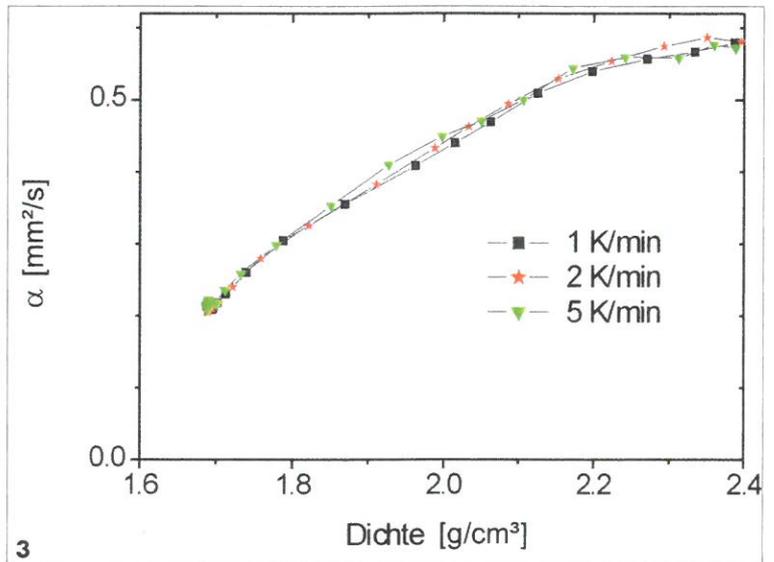


Bild 3 Temperaturleitfähigkeit während der Sinterung eines Porzellanscherbens bei verschiedenen Aufheizraten als Funktion der Dichte

Internet:
www.agni.de

Karl-Friedrich-Str. 74
52072 Aachen
Tel.: 0241-931 9292
Fax: 0241-931 9294
e-mail: info@agni.de



Hochtemperatur Öfen

elektrisch beheizt
kundenspezifische Fertigung
breites Anwendungsspektrum

AGNI Wärme- und
Werkstofftechnik GmbH

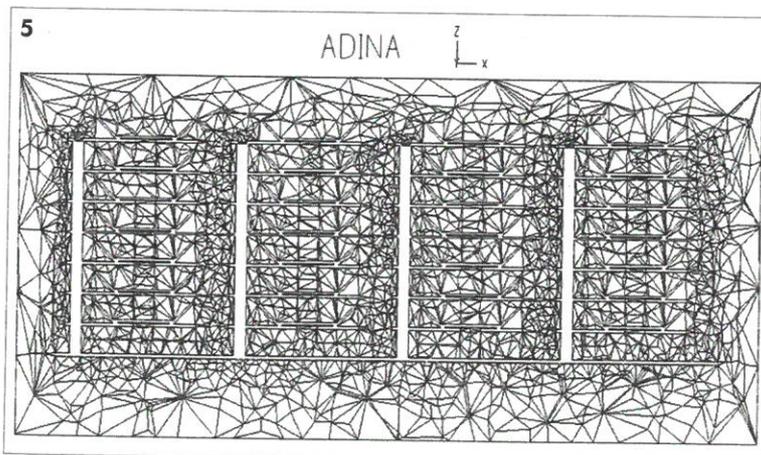
lässt sich der Einsatz von Ofenbaumaterialien unter echten Einsatzbedingungen nachempfinden und verbessern, und sie eröffnet Möglichkeiten zur risikoarmen, kostengünstigen und schnellen energetischen Optimierung der Ofenanlagen. Für die Berechnung ist es unerheblich, ob die Öfen intermittierend oder kontinuierlich betrieben werden. Beide Anlagentypen beinhalten instationäre Wärmeleitprozesse, z. B. bei der Isolierung der Ofenwagen im Tunnelofen oder bei der Ofenwandauskleidung von periodisch betriebenen Herd-, Kammer- oder Haubenöfen, die realitätsnah dreidimensional berechnet werden können und es damit ermöglichen, eine exakte Auskunft über thermische und mechanische Beanspruchungen zu geben.

Die Optimierung des Energiehaushalts einer Ofenanlage erfordert am Beispiel eines Tunnelofens die detaillierte Betrachtung von Wandverlusten, Ausfahrverlusten einschließlich der instationären Brennwagenverluste und von Abgasverlusten. Am schwierigsten gestaltet sich die Berechnung der Abgasverluste, weil sie von den sich gegenseitig beeinflussenden Wärmeübertragungsmechanismen der Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung der Festkörper und Gase sowie von den Geometrien im gesamten Ofenraum abhängen.

Bild 4
Glattbrandofen für den Glasurbrand von Porzellan

Ein Tunnelofen ist in Vorwärm-, Brenn- und Kühlzone unterteilt. In allen drei Zonen strömen die Fluide im Gegenstrom zum Brenngut. In der Vorwärmzone bis ca. 700 °C überwiegt die Wärmeübertragung durch Konvektion, während in der Brennzone die Strahlung im Dreieraustausch zwischen Ofenwand, Gas und Brenngut von dominierender Bedeutung ist. In der Kühlzone kann die Strahlung gegenüber der konvektiven Wärmeübertragung vernachlässigt werden. Die Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung der strömenden Fluide im Ofenkanalquerschnitt ist zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs zwingend erforderlich und kann durch Strömungssimulation ermittelt werden.

Bild 5
Vernetzung des frei durchströmten Kanals



Am Beispiel des im Bild 4 gezeigten Schnellbrandofens für den Glattbrand von Porzellan mit der typischen Besatzform für Flachware werden die Berechnungsschritte für eine Strömung in Ofenachsenrichtung erklärt: Aus Erfahrung weiß man, dass Strömungsberechnungen mit ihren notwendigen engmaschigen Netzwerken große Anforderungen an den Arbeitsspeicher stellen (für die Länge eines Brennwagens mit Besatz ist 1 GB gerade ausreichend). Das notwendige Netzwerk des frei durchströmten Besatzaufbaus besteht aus 394 000 Tetraederelementen mit 82 200 Knoten. Bild 5 gibt einen Eindruck der Vernetzung eines Ofenkanalquerschnitts wieder. Verschiedene Vernetzungsarten mit unterschiedlichen Vernetzungsalgorithmen sowie einer kombinierten Vernetzung mit den Systemrändern müssen zum Einsatz kommen, und schließlich führt eine automatische Netzgenerierung an den richtigen Stellen zur notwendigen Verfeinerung. Der Reynolds-Zahlenbereich, bezogen auf den leeren Querschnitt, wird dem Rechner eingegeben und über das Navier-Stokes-Gleichungssystem gelöst. K-ε-Berechnungsansätze erfordern eine wesentlich höhere Arbeitsspeicherkapazität und zeigen wegen der sehr geringen Geschwindigkeiten nur vernachlässigbare Unterschiede zur gewählten Lösungsmethode.

Bild 6 zeigt das Geschwindigkeitsprofil in der Mitte des halben Ofenkanalquerschnitts, direkt über den Tellern, mit dem Koordinatenursprung in Ofenkanalmitte. Die rote Linie zeigt die berechneten Werte, die mit der blauen, die aus der Messung mit einem Laser-Doppler-Anemometer stammt, gut übereinstimmt. Deutlich sind die Geschwindigkeitsmaxima im Randspalt und in den Stapelspalten und die minimalen Geschwindigkeitswerte direkt über den Tellern zu erkennen. Mit den Geschwindigkeiten über den Tellern lassen sich Reynolds-Zahlen mit dem Tellerdurchmesser als charakteristische Länge definieren und daraus werden nach der bekannten Nu-Re-Gleichung für überströmte Platten die Nusselt-Zahl und dann der gesuchte konvektive Wärmeübergangskoeffizient bestimmt. Zweckmäßig ist die Unterteilung der Ofenlänge in kleine Abschnitte, und eine Berechnung mit der Strömungsrichtung, so dass schließlich wie in [15] erläutert die Abgasverluste am Ofeneinlauf und die Energiebilanz ermittelt werden können.

5 Brennen eines Tellers

Um die Möglichkeiten der Sintersimulation zu demonstrieren, wurde der Brand eines Tellers simuliert. Der reale Brennprozess des untersuchten Tellers ist zweistufig und setzt sich aus Glüh- und Glattbrand (bei 920 °C bzw. 1400 °C) zusammen. Da die eigentliche Verformung während des Glattbrandes stattfindet, wurde auch nur dieser simuliert. Eine typische Brennkurve während des Glattbrands ist im Bild 2 zu sehen.

Für die Simulation wurde zuerst ein Finite-Elemente-Netz des Tellers und des Brennhilfsmittels vor dem Glattbrand erzeugt (Bild 7). Aufgrund der Rotationssymmetrie des Tellers ist eine axisymmetrische 2D-Rechnung ausreichend. Die Rechnung wurde mit quadratischen Elementen durchgeführt. Vergleichsrechnungen mit feineren Netzen ergaben identische Verformungen. Die Rechenzeit für das gezeigte Netz mit 500 Elementen betrug 1,5 h auf einer SGI-Workstation. Der Reibungskoeffizient zwischen Tellerfuß und Brennhilfsmittel bei Brenntemperatur ist nur schwer zu messen. Deshalb wurde hier ein Reibwert von 0,3 angenommen.

Bild 8 zeigt den simulierten Teller vor und nach dem Brand im Schnitt. Den gebrannten Teller zeigt Bild 9. Der Sinterschrumpf sowie das Absinken von Tellermitte und Tellerfahne ist in beiden Bildern deutlich zu erkennen. Die Über-

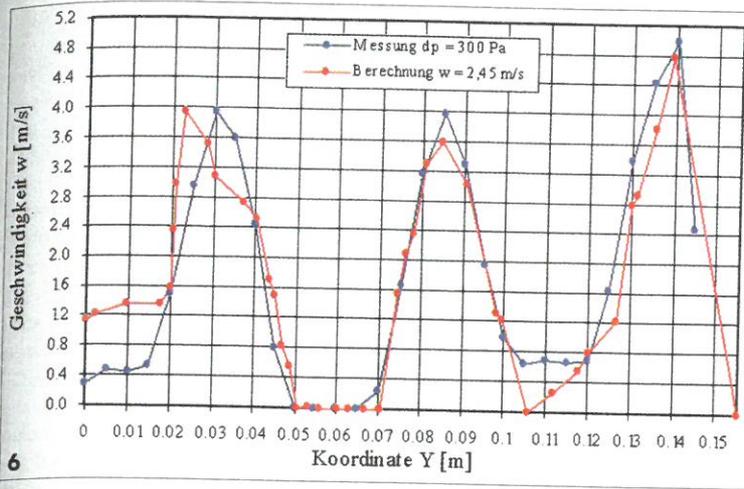


Bild 6
Geschwindigkeitsverteilung im Besatz



Bild 7
Teller und Brennhilfsmittel vor dem Glattbrand

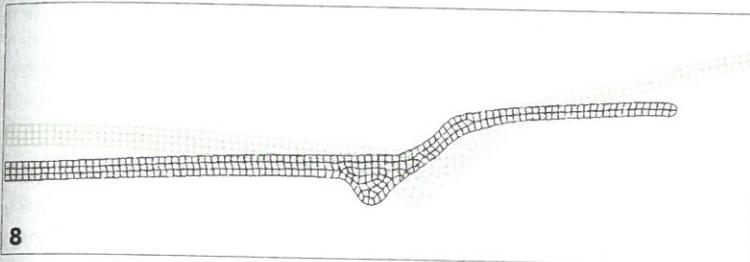


Bild 8
Teller vor (grün) und nach (schwarz) dem Glattbrand

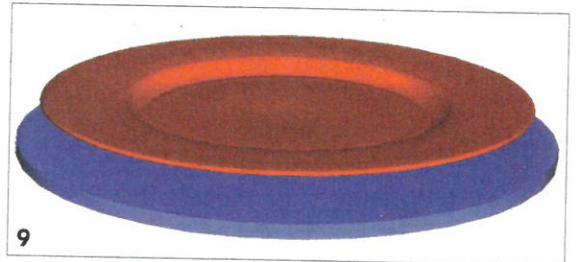
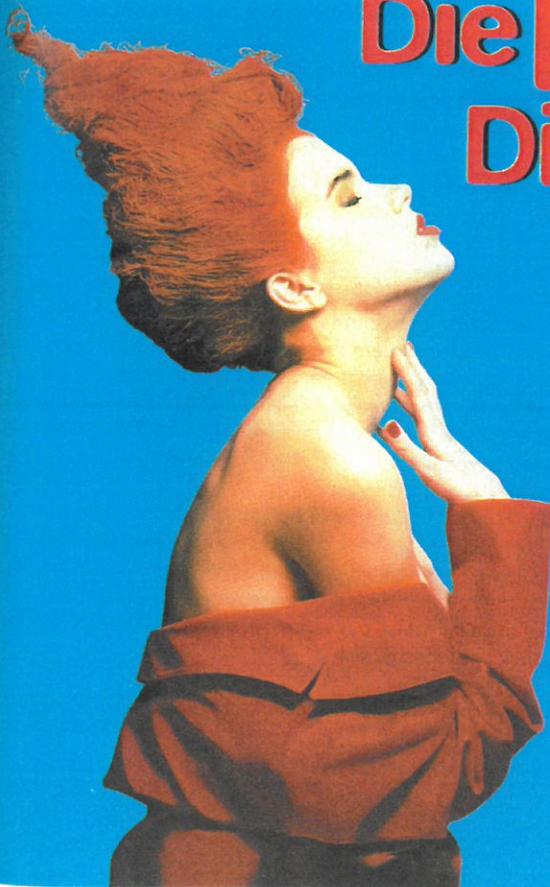


Bild 9
Teller und Brennhilfsmittel nach dem Glattbrand



Die heißesten Dinge lassen uns völlig kalt!

Mit dem Marktführer für Calciumsilikate "Promat Technische Wärmedämmung" behalten auch Sie immer einen kühlen Kopf, wenn es um sichere Hochtemperatur-Dämmung geht. Ob Stahl-, Eisen-, Aluminium-, Glas- oder Keramikindustrie: Wir haben für jedes Problem die optimale Lösung! Von der Materialauswahl über Konfektionierung und Engineering bis hin zur Montage.

Wir senden Ihnen gern weitere Informationen. Schreiben, faxen oder mailen Sie uns einfach.

Promat



Promat GmbH
Technische Wärmedämmung
Postfach 10 15 64
D-40835 Ratingen
Telefon 0 21 02 / 49 3-0
Telefax 0 21 02 / 49 31 15
www.promat.de
verkauf3@promat.de

an **Etex** GROUP company

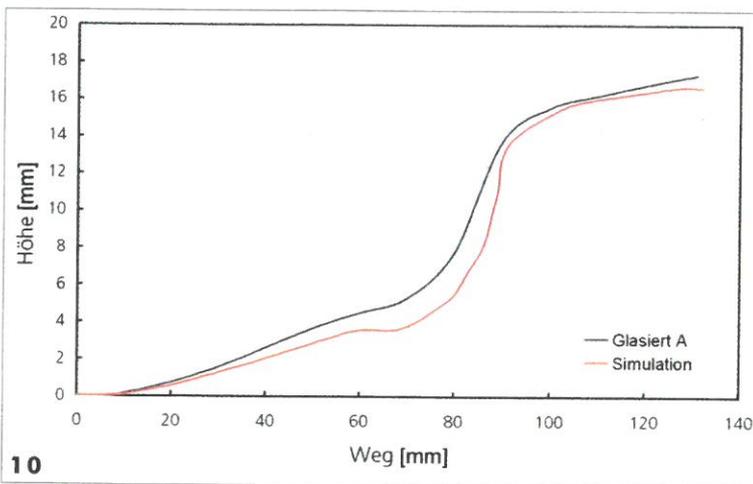


Bild 10
Vergleich der oberen Tellerkontur für einen glasierten Teller (blau) mit der Simulation (rot)

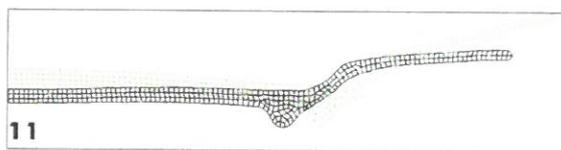


Bild 11
Teller vor (grün) und nach (schwarz) dem Glattbrand ohne Reibung zwischen Tellerfuß und Brennhilfsmittel

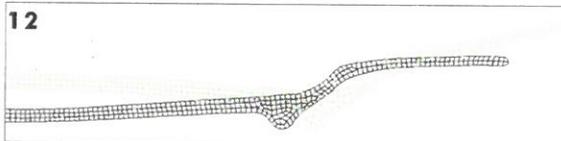


Bild 12
Teller vor (grün) und nach (schwarz) dem Glattbrand mit einem Reibwert zwischen Tellerfuß und Brennhilfsmittel von 1

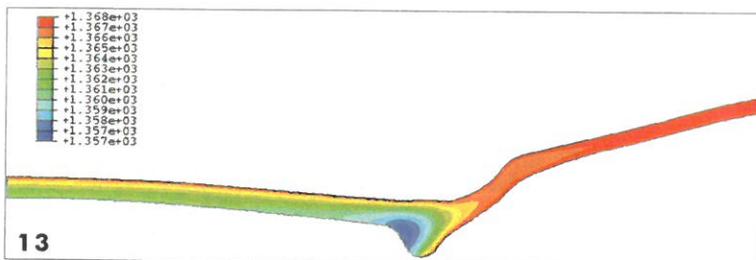


Bild 13
Temperaturverteilung im Teller während des Aufheizens kurz vor Erreichen der maximalen Brenntemperatur

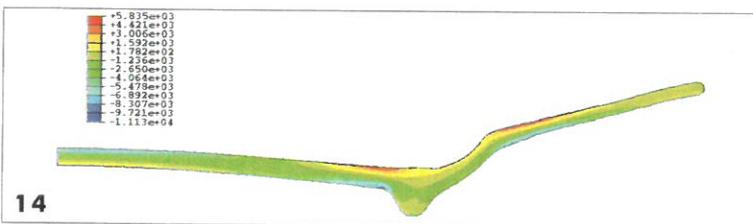


Bild 14
Radiale Spannungsverteilung im Teller durch Eigengewicht (ohne überlagerte Sinterspannungen)

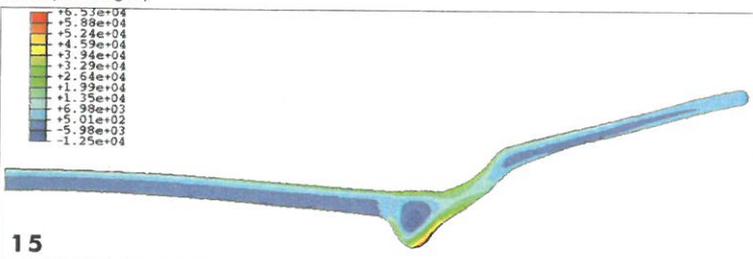


Bild 15
Maximale Hauptspannungen kurz vor Erreichen der maximalen Brenntemperatur (Überlagerung von Eigengewicht, thermischen Spannungen und Sinterspannungen)

einstimmung mit einem realen Teller ist für die Praxis ausreichend (Bild 10). Für eine noch bessere Übereinstimmung müsste u. a. die lokale Brennkurve und der Reibwert zwischen Tellerfuß und Brennhilfsmittel bekannt sein. Auch wurde ein Teil der Sinterumformversuche zur Bestimmung der Materialparameter unter Normalatmosphäre durchgeführt.

Um den Einfluss des Reibwerts zwischen Tellerfuß und Brennhilfsmittel zu untersuchen, wurden Rechnungen auch ohne Reibung (Bild 11) und mit einem sehr großen Reibwert von 1 durchgeführt (Bild 12). Es zeigt sich, dass das Absinken der Tellerfahne kaum vom Reibungskoeffizienten abhängt, während er auf die Durchbiegung in der Tellermitte doch einen gewissen Einfluss hat.

Schließlich wurde noch untersucht, wie sich die maximalen Spannungen und Temperaturdifferenzen während des Brennens verhalten. Da die genaue Temperaturverteilung im Ofen (incl. Beladung, Abschattungen etc.) im konkreten Fall nicht simuliert worden war, wurde angenommen, dass die Telleroberfläche mit Ausnahme der Unterseite unter dem Tellerboden (hier kommt keine Strahlungsheizung von den Ofenwänden an) die in Bild 2 gezeigte Temperatur besitze. Bild 13 zeigt die Temperaturverteilung kurz vor Ende des Aufheizens. Der maximale Unterschied beträgt etwa 10 K zwischen innerem Tellerfuß und Oberfläche. Bei der Optimierung der Ofensteuerung muss darauf geachtet werden, dass diese Differenz nicht zu groß wird, da sonst der Teller unterschiedlich sintert und Risse oder unerwünschte Verzüge entstehen können.

Die kritischen Spannungen können ebenfalls berechnet werden. Bild 14 zeigt die radiale Spannungsverteilung hervorgerufen durch das Eigengewicht (ohne überlagerte Sinterspannungen). Kritisch sind die roten Stellen, da hier die höchsten Zugspannungen von etwa 6000 Pa auftreten. In Umfangsrichtung (nicht dargestellt) treten am äußeren Tellertrand ebenfalls Zugspannungen von 9000 Pa auf. Die Spannungen während des Brandes zum Zeitpunkt der maximalen Temperaturdifferenz zeigt Bild 15. Die größten Spannungen treten hier auf der Außenseite des Tellerfußes auf. In dieser Rechnung wurde ein angenommener E-Modul verwendet, da zum Zeitpunkt der Rechnung noch keine Messwerte vorlagen.

6 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass der Verzug beim Brand von gebrauchskeramischen Artikeln mit guter Genauigkeit vorhergesagt werden kann, wenn die Materialparameter mit der notwendigen Sorgfalt bestimmt werden. Damit steht jetzt ein Hilfsmittel bereit, mit dem Press- oder Schlickergussformen so ausgelegt werden können, dass das gebrannte Teil die gewünschte Form aufweist. Die bisher übliche Vorgehensweise von Versuch und Irrtum bei der Konstruktion der Form kann so verkürzt werden.

Durch Einbeziehung der Simulation der inhomogenen Temperaturfelder im Brenngut können Hinweise auf kritische Stellen gewonnen werden. Zusammen mit der Simulation kompletter Öfen sind so Optimierungen der Ofensteuerung wie auch Hinweise auf verbesserte Konstruktionen der gesamten Anlage möglich.

Danksagung

Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsstiftung für finanzielle Unterstützung im Rahmen des FORKERAM-Programms (Teilprojekt 1-5) sowie der Porzellanfabrik Christian Seltmann GmbH, Weiden, für die Bereitstellung von Probenmaterial und für die Begleitung des Projekts.

Literatur

- [1] T. Kraft, H. Riedel, P. Stingl, F. Wittig: Finite Element Simulation of Die Pressing and Sintering, *Adv. Eng. Mater.* 1 (1999) 107-109
- [2] T. Kraft, H. Riedel: Density Evolution in a Powder Compact and Stresses in the Tools during Uniaxial Die Compaction, In: *Grünkörpercharakterisierung*, 8. Keramik-Tag der BAM, T. Rabe (ed.), Fortschrittsberichte DKG, Deutsche Keramische Gesellschaft, Köln 16 (2001) 76-83
- [3] H. Riedel, D. Meyer, J. Svoboda, H. Zipse: Numerical Simulation of Die Pressing and Sintering - Development of Constitutive Equations, *Int. J. Refractory Metals & Hard Materials* 12 (1993/94) 55-60
- [4] H. E. Exner, T. Kraft: Review on Computer Simulations of Sintering Processes, in: *Powder Metallurgy World Congress 1998*, Vol. 2, EPMA, Shrewsbury (1998) 278-283
- [5] E. A. Olevsky: Theory of Sintering: from Discrete to Continuum, *Mater. Sci. Eng. R* 23 (1998) 41-100
- [6] H. Riedel, B. Blug: A Comprehensive Model for Solid State Sintering and Its Application to Silicon-Carbide, In: *Multiscale Deformation and Fracture in Materials and Structures: The J. R. Rice 60th Anniversary Volume, Solid Mechanics and Its Application - Vol. 8*, 4, T. J. Chuang, J. W. Rudnicki (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2001) 49-70
- [7] P. E. McHugh, H. Riedel: A Liquid Phase Sintering Model - Application to Si_3N_4 and WC-Co, *Acta Mater.* 45 (1997) 2995-3003
- [8] weitere Literaturhinweise u. a. zum Sintermodell unter http://www.iwm.fhg.de/arbeitsgebiet/lb/thema_lb41/lit-pt.pdf
- [9] F. Raether, R. Hofmann, G. Müller, H. J. Sölter: A Novel Thermo-Optical Measuring System for the In-situ Study of Sintering Processes, *J. Thermal Analysis* 53 (1998) 717-735
- [10] C. Dannert: Untersuchungen zum Sinterverhalten von Porzellan, Dissertation, Universität Würzburg (2002) (in Vorbereitung)
- [11] F. Raether, R. Springer, S. Beyer: Optical Dilatometry for the Control of Microstructure Development During Sintering, *Mat. Res. Innovations*, Vol. 4 (2001) 245-250
- [12] C. Dannert, B. Durschang, F. Raether, F. Becker: Optimisation of Sintering Processes for Porcelain Using In-situ Measuring Methods, *Materials Week, München 2000, Symp. 13 Process Development*, www.materialsweek.org (2001)
- [13] weitere Literatur zur thermooptischen Messanlage unter <http://www.sinteropt.de>
- [14] F. Becker: Computersimulation zur Lösung wärmetechnischer Aufgaben im keramischen Ofenbau, *cfi/Ber. DKG* 78 (2001) [5] D9-D13
- [15] F. Becker: Berechnungsfortschritte für keramische Brennprozesse, *gas-wärme-international* 50 (2001) [8] 360-365

Dr. Torsten Kraft,
Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik,
Wöhlerstraße 11, D-79108 Freiburg

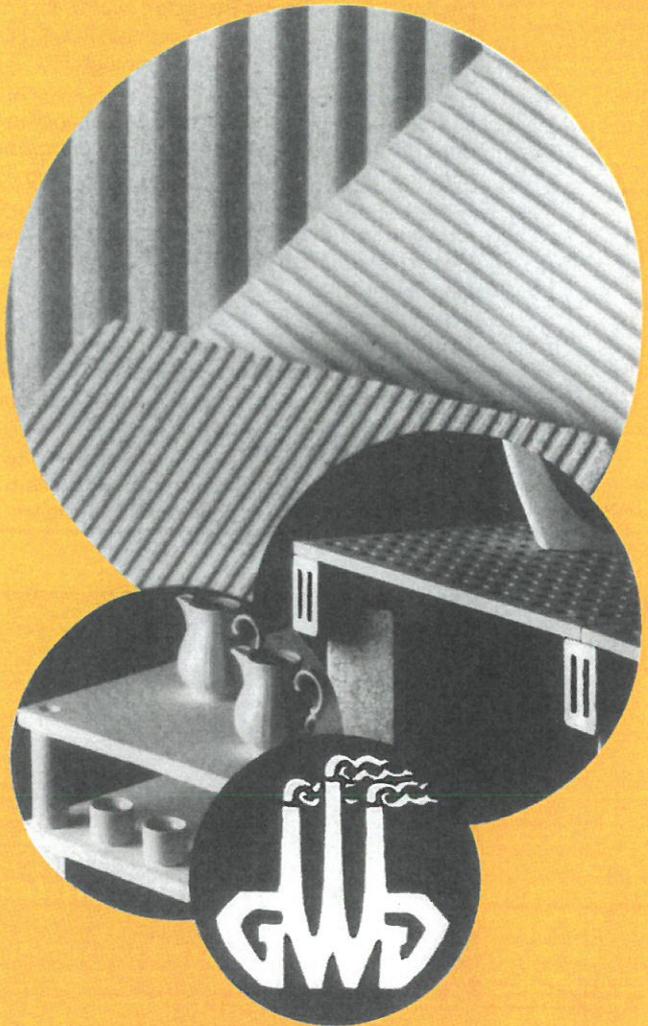
Prof. Dr. Hermann Riedel,
Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik,
Wöhlerstraße 11, D-79108 Freiburg

Dr. Friedrich Raether,
Fraunhofer Institut für Silicatiforschung,
Neunerplatz 2, D-97082 Würzburg

Dipl.-Ing. Friedherz Becker,
Riedhammer GmbH,
Klingenhofstraße 72, D-90411 Nürnberg

VON SPEZIALISTEN FÜR SPEZIALISTEN

Know How ist unsere Spezialität.
Wir helfen Ihnen schnell und gezielt.
Mit hochwertigen Brennhilfsmitteln,
die bis ins kleinste durchdacht sind.
Ein umfassendes Angebot an Leistungen,
die durch professionelle Beratung
und Service unterstützt werden.



GOEBEL-WERK GMBH BRENNHILFSMITTEL

POSTFACH 1240
D-37247 GROSSALMERODE
TEL. 0 56 04/9340
TELEFAX 0 56 04/934244