

Simulationssystem für die Entwicklung und Optimierung von thermischen Prozessen

Dipl. Ing.
Bernd Geismar

Dipl. Ing.
Alexander Kahl
mail@ctb-berlin.de
www.ctb-berlin.de

Einführung

Alle Keramikprodukte müssen einem thermischen Prozess unterzogen werden, um die benötigten Eigenschaften für bestimmte Anwendungen zu erhalten. Dabei spielt es keine Rolle, wie die Keramikprodukte geformt wurden. Der Brennprozess ist die wichtigste Phase im Verlauf des Herstellungsprozesses, da sich in diesem Stadium entscheidet, ob das Endprodukt fehlerfrei ist. Um einen optimalen Ablauf zu entwickeln, muss der Wissenschaftler oder der Ingenieur wissen, wie sich der Körper während des Aufheizens bei der Trocknung bzw. des Brennens verhält. Während des Aufheizens durchläuft das Keramikprodukt physikalische und chemische Umwandlungen, welche die Art und Weise, wie das Produkt getrocknet oder gebrannt wird, beeinflusst.

Die physikalischen und chemischen Umwandlungen haben Dimensionsänderungen zur Folge (Expansion oder Schwindung), Abgabe oder Aufnahme von Energie, Abbau von organischen und anorganischen Verbindungen und eine Vielzahl von chemischen Reaktionen. Man kann keinen optimierten und kosteneffizienten Brennprozess entwickeln, wenn dieser komplexe Vorgang nicht verstanden wurde.

Dilatometer und STA-Geräte sind Standard, wenn es darum geht herauszufinden, was während des Aufheizens und der Abkühlung im keramischen Material vor sich geht. Dimensionsänderungen werden mit Hilfe von Dilatometern gemessen, mit DTA-Geräten (Differenz-Thermo-Analysen) erfolgt die Messung der abgegebenen (exothermen) Energie oder aufgenommenen (endothermen) Energie, mit TGA-Geräte (Thermogravimetrische Analysen) wird der Massenverlust bzw. die Massenzunahme während des Aufheizung und Abkühlung ermittelt.

Die erhaltenen Daten helfen den Ingenieuren, die Phänomene, bezogen auf die thermischen Prozesse von Keramikversätzen, zu verstehen. Das ist ein wichtiger Fortschritt in

Richtung einer optimalen Entwicklung des thermischen Prozesses.

Jedoch werden die oben genannten Studien anhand von Proben von Keramikprodukten im Milligramm- oder Zentimeterbereich durchgeführt. Die erhaltenen Daten sind zwar hilfreich, zeigen aber nicht, was im ganzen Produkt passiert. Da nicht alle Phänomene der Wärme- und Massenreaktion übereinstimmen, können diese Studien nur begrenzt Informationen liefern. Damit wird der Entwicklungsprozess verlängert.

Simulationssystem

CTB hat einen komplexen, hoch entwickelten Brennofen für Forschungszwecke gebaut (Bild 1), welcher diese Schwächen überwindet und Wissenschaftlern und Ingenieuren ein Hilfsmittel zur gründlichen Untersuchung von keramischen Körpern während des Brennprozesses, bei Temperaturen, die von Zimmertemperatur bis 1 600°C oder, wenn benötigt, sogar höher reichen.

Hauptmerkmale dieser Anlage sind:

- Tests können an vollständigen Prototypen bis zu 30 kg und 500x500x500mm³ durchgeführt werden
- Aufheizungs-/Kühlungsraten von 10 K/min können simuliert werden.
- Während der Wärmebehandlung können verschiedene Atmosphären simuliert werden (oxidierend, reduzierend, bestimmte Gase, N₂, inert oder erzeugt durch Verbrennung von fossilen Energieträgern)
- Die schnelle Veränderung der Ofenatmosphäre erlaubt eine Untersuchung der Effekte auf das Keramikprodukt in physikalischer und chemischer Hinsicht. Fortlaufende Dimensions- oder Massenveränderungen (Verlust oder Zunahme) werden mit einer sehr großen Genauigkeit gemessen. Dimensionsänderungen werden an vier verschiedenen Stellen des Produkts gemessen. Die Anlage hat 12 Thermoelemente, die in das Produkt eingeführt werden können, um die exothermen und



Bild 1
Forschungsöfen

endthermen Reaktionen zu bestimmen und diese mit den Dimensions- oder Massenveränderungen zu korrelieren.

- Echtzeitanzeige aller gemessenen Variablen (Temperaturen, Zusammensetzung der Atmosphäre während des Aufheizens und der Abkühlung, Wechselraten pro Stunde, Anlageparameter usw.)
- Einfache Konfiguration der Bedingungen des thermischen Prozesses in einer Excel-Tabelle
- Ein Programm, welches die Temperatur anhand des gewünschten Massenverlusts, der Dimensionsänderungen und Wärmeübertragung in das Produkt regelt ist vorhanden
- Die Daten können leicht am Ende des Experiments abgerufen werden
- Sichere Handhabung.

Versuche

Die folgenden Beispiele zeigen, wie der Simulator eingesetzt werden kann, um das Verhalten von keramischen Versätzen während der Wärmebehandlung zu studieren, und wie man nützliche Informationen für die Prozessentwicklung erhalten kann.

Dimensionsänderungen

Das keramische Produkt schwindet oder expandiert während des Aufheizens oder der Abkühlung. Dies

erzeugt Spannungen, die Risse oder Formveränderungen im Endprodukt verursachen können. Der Ingenieur wird, wenn er den Temperaturbereich kennt, in welchem Dimensionsänderungen stattfinden, die Aufheizungs- oder Kühlungsraten so festlegen, dass das Endprodukt keine Risse aufweist und die gewünschte Größe und Form hat.

Die CTB- Anlage kann die Dimensionsänderungen des keramischen Produkts an vier Stellen mit zwölf Thermoelementen messen und sie in Beziehung zur Temperatur des Produkts setzen. Einige Thermoelemente können sehr nah an die Stelle gesetzt werden, wo Dimensionsänderungen stattfinden. Somit kann eine noch genauere Beziehung zwischen Temperatur und Dimensionsänderungen hergestellt werden. Die Daten können (bezogen auf den Messpunkt) separat aufgezeichnet werden und können getrennt oder zusammen wiedergegeben werden. Bild 2 zeigt zwei Fälle, die während des Aufheizens im Keramikkörper auftreten können.

Fall 1: Die Innentemperatur in einigen Keramikprodukten, die organische Zusatzstoffe enthalten, können, wegen der exothermen Reaktion, verursacht durch das Verbrennen des organischen Bestandteils in relativ hoher Sauerstoffkonzentration in der Brennofenatmosphäre, höher als die Temperatur auf der Oberfläche des Produkts werden. Die durch das Verbrennen der organischen Komponente erzeugte Wärme gelangt nicht einfach an die Oberfläche, und deshalb wird die Innentemperatur die Außentemperatur übersteigen. In diesem Fall schrumpft der Körper im Inneren mehr als an der Oberfläche. Durch den Widerstand an der Oberfläche wird das Innere unter Spannung gestellt, sodass Risse auftreten können.

Fall 2: Die Oberflächentemperatur des Keramikkörpers ist aufgrund einer endothermischen Reaktion, verursacht durch die Abgabe von chemisch gebundenem Wasser, Zersetzung von verschiedenen Bestandteilen etc., höher als die Temperatur im Inneren. Die benötigte Reaktionswärme kann nicht einfach von der Oberfläche ins Innere geleitet werden, somit bleibt die Innentemperatur hinter der Oberflächentemperatur zurück. In diesem Fall schrumpft die Oberfläche des Produkts mehr als das Innere, und aufgrund des Widerstands im Inneren wird die Oberfläche unter Spannung

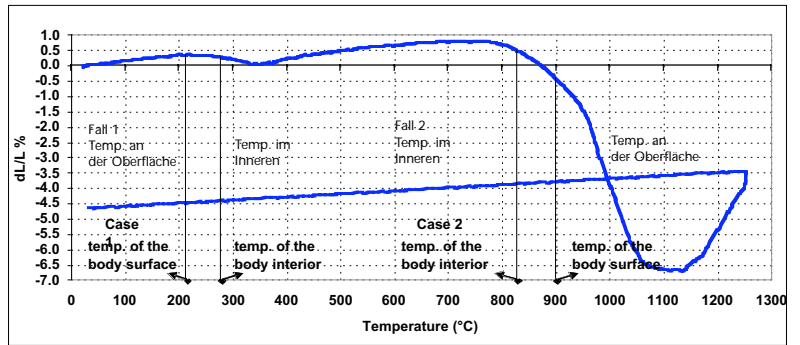


Bild 2 Längenänderung eines ungebrannten Körpers während der Wärmebehandlung

gestellt, aufgrund dessen es zu Rissen kommen kann. Der Ingenieur kann diese Probleme lösen, indem er den thermischen Gradienten in diesen Regionen reduziert und somit auch die Spannungen im Keramikkörper.

Massenverluste

Während der Wärmebehandlung verändert der Keramikkörper seine Masse. Bild 3 gibt ein Beispiel für einen Fall, der mit der CTB- Anlage studiert werden kann.

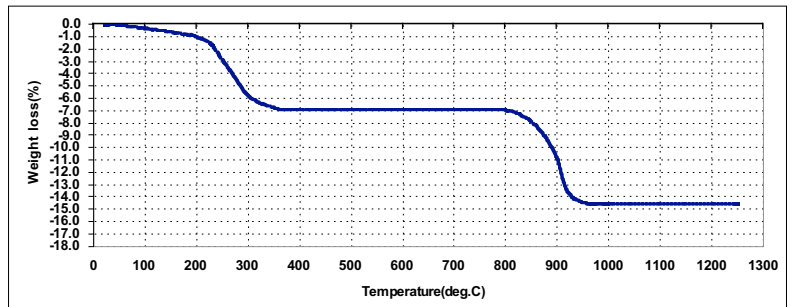


Bild 3 Masseverlust (mass loss) des getrockneten Rohkörpers

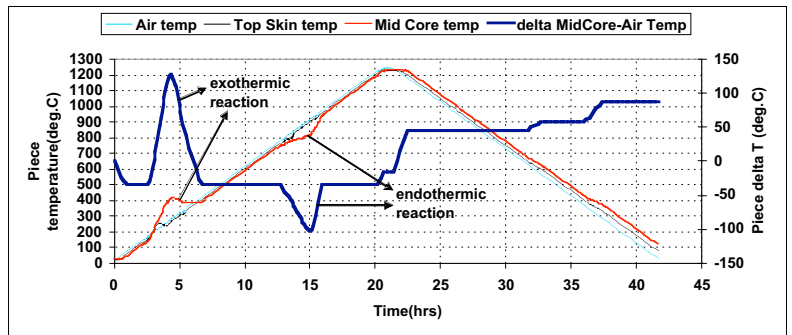


Bild 4 Temperaturverteilung im Rohkörper (piece temperature) während der Wärmebehandlung (Luft Tem.: air temp.; Oberflächentemp.: top skin temp., Kern temp.: mid core temp.; Differenz Kern/Luft Temp.: delta mid core/air temp.)

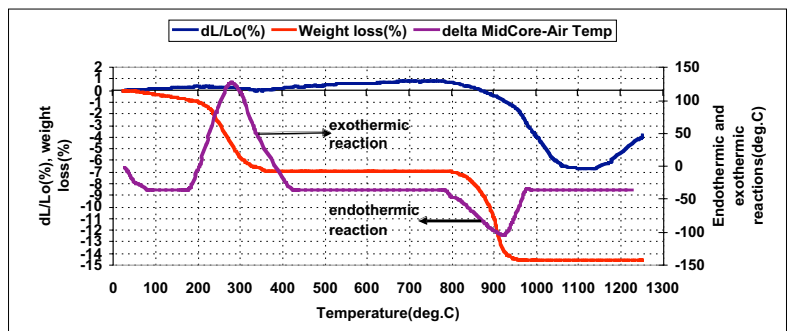


Bild 5 Längenänderung (dL/L_0), Massenverlust (mass loss), endotherme und exotherme Reaktionen im Rohkörper während der Wärmebehandlung (Differenz Kern/Luft Temp.: delta mid core/air temp.)

In den Temperaturbereichen 200 bis 300°C und 800...900°C durchläuft das Produkt einen schnellen Massenverlust aufgrund von verschiedenen Reaktionen, wie z.B. Beseitigung von organischen Bestandteilen, Abgabe von nicht-organischen Komponenten, Abspaltung von chemisch gebundenem Wasser, Ausbrennen von Porussierungsmitteln, etc. Wenn diese Reaktionen nicht kontrolliert werden und die Gasentwicklung zu schnell ist, kann das den Körper schädigen. Basierend auf den oben genannten Informationen, kann der Ingenieur die Reaktionen durch Aufheizgeschwindigkeit bzw. Brennbedingungen kontrollieren. Diese Funktion kann automatisch mit dem CTB Prioritätsprogramm eingestellt werden, welches den gewünschten Massenverlust durch die Regelung der Aufheizgeschwindigkeit und der Brennbedingungen einstellt.

Endotherme und exotherme Reaktionen

Während der Aufheizung und des Abkühlens finden im Keramikprodukt physikalische und chemische Umwandlungen statt, die Wärme abgeben (exotherme Reaktion) oder Wärme aufnehmen (endotherme Reaktion). Diese Reaktionen beeinflussen die Eigenschaften und Mängel im Endprodukt. Es ist sehr wichtig für die Entwicklung von thermischen Prozessen, den Temperaturbereich zu kennen in welchem die Reaktionen auftreten. Die Reaktionen werden durch die Temperaturmessung des Produkts während der Wärmebehandlung begrenzt. Bild 4 veranschaulicht die Infor-

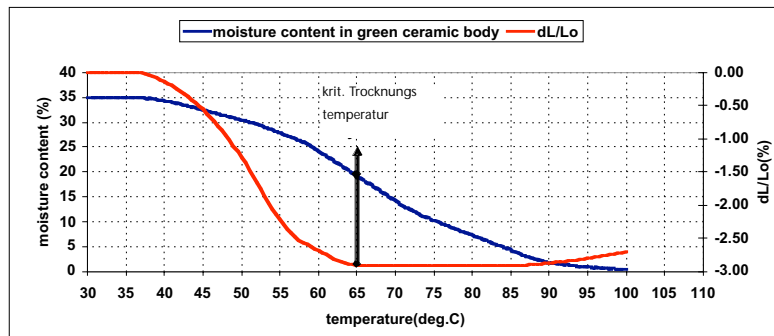


Bild 6 Massenverlust und Längenänderung im feuchten Rohkörper während der Trocknung (moisture content in green ceramic body: Feuchte im keramischen Rohling)

mationen, die die CTB-Anlage bestimmt.

Bild 5 zeigt alle Informationen zusammengefasst. Der Ingenieur hat ein komplettes Bild aller Phänomene, die im originalgroßen Keramikprodukt während der Aufheizung und Abkühlung stattfinden. Er kann die Effekte der Aufheizungs- oder Abkühlungsgeschwindigkeit, der verschiedenen Brenn Atmosphären, Veränderung unterschiedlicher Produkteigenschaften und Fehler studieren, um die optimalen Parameter für einen kosteneffizienten Brennprozess herauszufinden.

Die Benutzung des CTB- Simulators hat den Vorteil, dass sich alle Phänomene auf die Massen- und Wärmeübertragung im Produkt in Originalgröße beziehen.

Der CTB- Brennsimulator kann benutzt werden, um Trocknungsprozesse am Original in Bezug auf Temperatur und relative Luftfeuchte zu studieren. Die gelieferten Daten geben Auskunft über Massenverlust und dimensionale Veränderungen im Zusammenhang mit Temperatur und dem der Feuchtigkeitsgrad der

Umgebung. Diese Daten helfen dem Ingenieur, optimale und kosteneffiziente Trocknungsprozesse zu entwickeln. Die Anlage kann so eingestellt werden, dass sie die Feuchtigkeitsabnahme sowohl den Trocknungsparametern als auch dem Feuchtigkeitsgrad und der Aufheiztemperatur anpassen kann.

Bild 6 erläutert das Verhalten des feuchten Rohkörpers während der Trocknung. Die Anlage kann so programmiert werden, dass die Feuchtigkeitsabnahme sowohl mit den Trocknungsparametern als auch mit dem Feuchtigkeitsgrad und der Temperatur des erhitzten Mediums korreliert.

Das CTB- Gerät kann auch dafür verwendet werden, das Abschrecken von keramischen Materialien unter diversen Temperaturbedingungen zu untersuchen.

Der einzigartige Forschungsöfen soll eine Brücke zwischen der Materialwissenschaft und der Produktentwicklung für Forscher und Ingenieure, die an einem neuen Produkt in der Keramikindustrie arbeiten, sein.