

Aktueller Stand der industriellen Mikrowellentrocknung

M. Möller*, H. Linn*

Einleitung

Auch wenn unter „Thermischer Verfahrenstechnik“ zumeist nur die Hochtemperaturbehandlung von Produkten, also das Entbindern, Ausbrennen, Sintern, usw., verstanden wird, ist die Trocknung ein wichtiger und oft unterschätzter Prozeßschritt in vielen keramischen Herstellungsverfahren.

Obwohl versucht wird die Notwendigkeit der Trocknung während des Herstellungsprozesses durch z.B. Trockenpressen zu eliminieren, ist dies in vielen Fällen aus technologischen Gründen nicht möglich.

Um dem anhaltenden Trend der Verbesserung von Herstellungsprozessen und Erhöhung der Energieeffizienz zu folgen, ist daher die Optimierung der Trocknungsprozesse oftmals der einzige Weg. Die konventionelle Trocknungstechnik ist dabei vielfach schon weitgehend ausgereizt, da sich Stoff- und Wärmetransportvorgänge im Produkt nicht beliebig beschleunigen lassen.

Als mögliche Alternative bietet sich dafür die Mikrowellenerwärmung.

Theorie der Mikrowellentrocknung

Die Mikrowellentrocknung von Keramiken hat in der Praxis einige deutliche Vorteile gegenüber der konventionellen Trocknung („konventionell“ in dem Sinne, daß die Wärmeeinbringung in das Innere des Produktes durch Wärmeleitfähigkeit erfolgt, dazu gehört also auch Infraroterwärmung). Diese Vorteile sind auf den ersten Blick nur schwer ersichtlich und bedürfen daher einer etwas ausführlicheren Erläuterung.

Das Mikrowellen Materialien sehr schnell und homogen aufheizen können dürfte mittlerweile weitgehend bekannt sein. Dies resultiert aus der speziellen Eigenschaft von Mikrowellen als elektromagnetische Wellen in das Produkt eindringen zu können und erst dort in Wärme umgewandelt zu werden. Diese Eigenschaft wiederum basiert darauf, daß im Mikrowellen-Frequenzbereich viele dielektrischen Materialien eine für die Erwärmung günstige Kombination von Transmission und Absorption aufweisen. Bei Frequenzen deutlich unterhalb des Mikrowellenbereichs wird die Transmission so hoch, daß die meisten dielektrischen Materialien praktisch durchsichtig für die elektromagnetischen Wellen sind. Bei Frequenzen deutlich über dem Mikrowellenbereich ist die Absorption so hoch, daß die Wellen praktisch nicht mehr in das Material eindringen können und so nur eine Oberflächenerwärmung stattfindet (Infraroterwärmung).

Dadurch, daß Mikrowellen als elektromagnetische Welle in das Material eindringen und erst im Inneren des Produktes in Wärme umgewandelt werden, ist die Erwärmung unabhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Materials. Somit ist für die Geschwindigkeit der vollständigen Erwärmung bei Mikrowellen nicht die Wärmeleitfähigkeit entscheidend, sondern eher die Ankopplungseigenschaften (Dielektrizitätskonstanten) des Materials. Durch den zumeist relativ hohen Wasseranteil der zu trocknenden Keramiken ist eine gute Ankopplung in den meisten Fällen sichergestellt.

Bei der Trocknung jedoch ist eigentlich zu erwarten, daß eine sehr schnelle Wärmeeinbringung in das Produkt eher negative Auswirkungen auf das Trocknungsergebnis hat, da die Trocknungsgeschwindigkeit weitgehend vom Stofftransport bestimmt wird. Eine schnelle Wärmeeinbringung in das Innere des Produktes sollte daher nach der klassischen Theorie der Trocknung zu hohen Wasserdampfdrücken im Inneren des Produktes führen, die auf Grund des limitierten Stofftransportes (Wasserdampfdiffusion) nicht abgebaut werden können und bei überschreiten der Grünfestigkeit des Materials dementsprechend zu Rissen führen sollten.

Aus der Praxis der industriellen Mikrowellentrocknung ist jedoch bekannt, daß Keramiken mit Mikrowellen deutlich schneller und mit weniger Risiko für Trocknungsrisse getrocknet werden können, als dies mit konventionellen Methoden möglich ist. Daher muß es einen zusätzlichen

* Linn High Therm GmbH

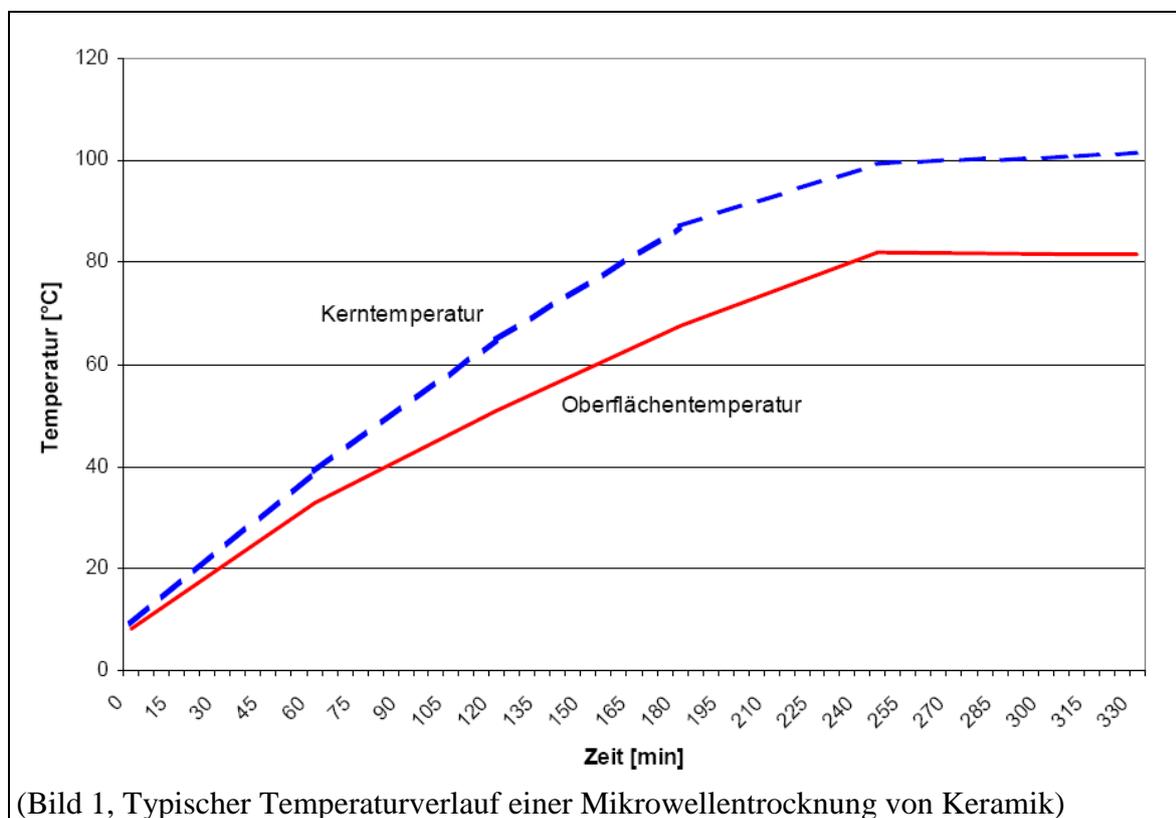
Heinrich-Hertz-Platz 1, 92275 Eschenfelden

Mechanismus geben, der bei der Mikrowellentrocknung wirkt und diese Beschleunigung der Trocknung wesentlich beeinflusst.

Soweit uns bekannt ist, wurde dieser Mechanismus bisher nicht wissenschaftlich erforscht, daher wird versucht eine Theorie dieses Effektes zu entwickeln.

Der Effekt muß eine Verbesserung des Stofftransportes innerhalb des keramischen Materials bewirken, da nur so die deutliche Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit ohne ein erhöhtes Risiko von Trocknungsrissen zu erklären ist. Eine mikrowellenbedingte Verbesserung der Wasserdampfdiffusion wäre die naheliegendste Erklärung. Unseres Wissens nach gibt es jedoch in der Literatur keine Hinweise darauf, daß Mikrowellen Diffusionskoeffizienten beeinflussen können.

Vermutlich wird der Effekt durch den wesentlichen Unterschied von Mikrowellen- und konventioneller Erwärmung hervorgerufen, dem unterschiedlichen Temperaturprofil im Produkt. Im Gegensatz zu konventioneller Erwärmung erzeugen Mikrowellen ein sogenanntes „inverses“ Temperaturprofil, bei dem die höchsten Temperaturen im Inneren des Produktes auftreten und die Oberfläche die niedrigsten Temperaturen aufweist. Dies wird durch die Wärmeverluste der Produktoberfläche an die umgebende Atmosphäre hervorgerufen, da diese bei reiner Mikrowellenerwärmung nicht direkt erwärmt wird (Gase sind nahezu vollkommen transparent für Mikrowellen). Siehe Bild 1.



(Bild 1, Typischer Temperaturverlauf einer Mikrowellentrocknung von Keramik)

Auf Grund dieses inversen Temperaturprofils ist zu erwarten, daß die für die konventionelle Trocknung aufgestellte Trocknungstheorie für die Mikrowellentrocknung modifiziert werden muss. So ist davon auszugehen, daß eine Bewegung der Trocknungsfrent von Außen nach Innen nicht stattfinden wird, da dies entgegen des Temperaturgradienten geschehen müsste. Eine zu erwartenden Bewegung der Trocknungsfrent mit dem Temperaturgradienten würde in einer Trocknung von Innen nach Außen resultieren. Dazu müsste jedoch ein Stofftransport durch die noch wasserhaltigen äußeren Schichten des Produktes erfolgen, wobei eigentlich eine deutlich reduzierte Trocknungsgeschwindigkeit zu erwarten wäre.

Um dies zu erklären, muß ein Blick auf die Porosität der Keramik geworfen werden, da diese für jede Art von Trocknung entscheidenden Einfluß hat. Bei der Porosität unterscheidet man zwischen offenen Poren (solche die mit der Oberfläche verbunden sind) und geschlossenen Poren (solche die nicht mit der Oberfläche verbunden sind). Vor Beginn der Trocknung sind alle Poren

vollständig mit Wasser gefüllt. Während der Trocknung wird das Wasser aus den Poren entfernt, wodurch sich diese verkleinern, was zur bekannten keramischen Trockenschwindung führt.

Bei konventioneller Trocknung werden nun die Poren an der Oberfläche zuerst abgetrocknet, wodurch sich diese schließen und somit einen erheblichen Widerstand gegen den Stofftransport aus dem Inneren des Produktes bilden. Daraus resultiert die geringe Trocknungsgeschwindigkeit bei konventioneller Erwärmung.

Bei Mikrowellenerwärmung ist zu erwarten, daß die Poren an der Oberfläche relativ lange Zeit mit Wasser gefüllt bleiben, da die Oberflächentemperatur für eine effektive Verdampfung nicht ausreicht. Somit stehen die noch nicht geschrumpften Porenquerschnitte für einen effektiven Stofftransport zur Verfügung.

Für die Mikrowellentrocknung ergibt sich daher folgendes Bild für den Wärme- und Stofftransport. Auf Grund des inversen Temperaturprofils der Mikrowellenerwärmung erreicht die Temperatur im Inneren des Produktes zuerst höhere Werte. Dadurch wird ein Wasserdruck aufgebaut, der aber nicht zur Schädigung des Produktes führt, da er über die noch vollständig geöffneten Poren der äußeren Schichten abgebaut werden kann. Dies führt zu einem effektiven Stofftransport aus dem Inneren des Produktes.

Somit ist von einer Bewegung der Trocknungsfront von Innen nach Außen auszugehen. Die Oberfläche trocknet daher erst ab wenn auch dort die entsprechende Temperatur erreicht ist. Das deutliche Überschreiten von 100°C an der Oberfläche ist daher bei der Mikrowellentrocknung üblicherweise ein Zeichen dafür, daß die Trocknung abgeschlossen ist.



(Bild 2, Mikrowellen Band Trockner für Diesel Partikel Filter)

Die in der Praxis erreichbaren Trocknungsgeschwindigkeiten hängen von vielen Faktoren ab (Wassergehalt, Form, Materialzusammensetzung, etc.) und sind daher ohne Versuch nur sehr schwer abzuschätzen. Bei Überschreiten der Trocknungsgeschwindigkeit treten die gleichen Probleme wie bei der konventionellen Trocknung auf (Verformung, Risse, Abplatzen, etc.).

Hinzu kommt, daß die bei konventioneller Trocknung gemachten praktischen Erfahrungen bei der Mikrowellentrocknung häufig nicht zutreffen. So ist z.B. die Regel, daß bei konventioneller Trocknung nach Abschluß der Schwindung keine Rissgefahr mehr besteht und daher so schnell getrocknet werden kann wie möglich, bei Mikrowelle nicht zutreffend. Da die Mikrowellen die Wärme direkt in das Innere des Produktes einbringen, können schon sehr geringe Restwassermengen ausreichen um bei zu hoher Leistungseinbringung das Produkt, mit sehr dramatischen Folgen, zu zerstören.

Aktuelle Entwicklungen in der Mikrowellentrocknung von Keramiken

Die industrielle Mikrowellentrocknung hat sich in den letzten Jahren in einigen Bereichen der Keramik als Stand der Technik durchgesetzt. Gleichzeitig gibt es aber auch viele keramische Anwendungen in denen die Mikrowellentrocknung ihre Vorteile bereits bewiesen hat, sich aber noch nicht allgemein durchgesetzt hat.

Den vielleicht wichtigsten Durchbruch hat die Mikrowellentrocknung im Bereich Wabenkeramik für Katalysatorträger und neuerdings auch für Diesel Partikel Filter (DPF) erlebt. Im DPF Bereich ist die Mikrowellentrocknung bereits seit dem Beginn der Entwicklung als Standardverfahren etabliert.

Die Schwierigkeit bei der Trocknung der Wabenkeramiken liegt in ihrer kompliziert geformten Struktur mit sehr geringen Wandstärken. Dadurch ist die Durchströmbarkeit der Waben gering und die Wärmeleitfähigkeit der Gesamtstruktur ist ebenfalls schlecht. Somit bereitet es große Probleme die Waben mit konventionellen Methoden (Warmluft, Infrarot, etc.) aufzuwärmen.

Hier bietet die Mikrowellenerwärmung große Vorteile, da sie selbst diese kompliziert geformten Bauteile vollständig erwärmen kann. Jedoch ist auch bei der Mikrowellentrocknung eine Durchstömung der Waben notwendig um das Wasser zu entfernen. Dabei gibt es zwei grundsätzliche Strategien.

Bei der ersten Methode werden die Waben während der Mikrowellenerwärmung von der Luft durchstößt um eine gleichmäßige und kontinuierliche Trocknung zu ermöglichen. Dabei wird zumeist die Luft vorgewärmt um eine höhere Wasseraufnahme zu ermöglichen. Mittels verschiedener Parameter (Produkttemperatur, Lufttemperatur, Luftmenge, Trocknungszeit, etc.) kann auf die Trocknung Einfluß genommen werden um die Spezifikationen hinsichtlich Feuchterverteilung, Dimensionsstabilität, etc. zu erfüllen. Änderungen der Durchströmbarkeit der Waben, z.B. durch unsauberes Abschneiden der Teile nach dem Extruder wodurch die Zellen verschlossen werden, haben einen großen Einfluß auf das Ergebnis der Trocknung. Ein relativ aufwändiges Luftsystem ist notwendig um die vollständige und kontinuierliche Durchströmung der Teile im Durchlauf sicherzustellen. Siehe Bild 2.

Bei der zweiten Methode wird die Erwärmung und Trocknung entkoppelt indem in einem ersten Schritt nur die Mikrowellenerwärmung stattfindet, wobei die Atmosphäre bei einer hohen Luftfeuchte gehalten wird um eine Trocknung zu verhindern. In einem zweiten Schritt wird dann Luft durch die Waben geblasen um eine schnelle Trocknung zu erreichen. Dabei verdampft das Wasser rasch und wird abgesaugt. Dabei muß die vorher erreichte Temperatur der Waben so gewählt sein, daß die enthaltene Wärmemenge zur Verdampfung des Wassers ausreicht, wobei die Waben abkühlen.

Beide Methoden haben bei Waben aus Siliziumcarbid das Problem, daß es durch die guten Ankopplungseigenschaften des SiC dazu kommen kann, daß die Waben so heiß werden, daß die organischen Binder in der Masse beginnen zu reagieren. Daher ist es aus Sicherheitsgründen zumeist notwendig, daß die SiC Waben nicht bis zur Endfeuchte in der Mikrowellenanlage getrocknet werden, sondern in einem



(Bild 3, Mikrowellen Kammer Trockner für Porzellanfiguren und Gipsformen)

anschließenden konventionellen Trockner endgetrocknet werden.

Eine Anwendung der Mikrowellentrocknung die sich bereits in mehreren Anlagen bewährt hat, sich aber noch nicht allgemein durchgesetzt hat, ist die Trocknung von gegossenen Produkten. Es ist die Anwendung bereits sowohl für den Schlickerguss in traditionellen Gipsformen als auch für den Druckguss realisiert worden.

Beim Schlickerguss werden die Mikrowellen zur Weißtrocknung von Figurenporzellan, Vasen, etc. eingesetzt. Insbesondere bei den Porzellanfiguren ergibt sich durch die Mikrowellentrocknung eine erhebliche Verkürzung der Trocknungszeit. Große Figurengruppen können bei der konventionellen Klimatrocknung Trocknungszeiten von bis zu mehreren Monaten aufweisen und selbst kleinere Einzelfiguren haben zumeist Trocknungszeiten von über einer Woche. Die Mikrowellentrocknung kann hier eine Verkürzung von mehreren Monaten auf etwa eine Woche erreichen bzw. von über einer Woche auf etwa einen Tag. Siehe Bild 3.

Diese unerwartet deutliche Verkürzung der Trocknungszeit bei diesen sehr komplex geformten Produkten kann darauf zurückgeführt werden, daß bei der Mikrowellenerwärmung die Energieübertragung volumenabhängig erfolgt und nicht wie bei der konventionellen Erwärmung oberflächenabhängig. Bei diesen Produkten mit sehr stark unterschiedlichen Schichtdicken der Keramik ergibt sich bei konventioneller Trocknung das Problem, daß gerade die Bereiche mit geringer Dicke zumeist eine relativ große Oberfläche aufweisen und somit leicht Wärme aufnehmen und daher schnell Trocknen. Die Bereiche des Produktes mit relativ hohen Schichtdicken haben hingegen eine relativ geringe Oberfläche, wodurch sie nur langsam Wärme aufnehmen und daher langsam Trocknen. Um Trocknungsrisse zu vermeiden muß daher die Trocknung der dünnen Bereiche verlangsamt werden um eine Gleichmäßige Trocknung des gesamten Produktes zu erreichen. Dies führt zu den sehr langen Trocknungszeiten bei konventioneller Erwärmung.

Bei der volumetrischen Mikrowellenerwärmung hingegen nehmen die dünnen Bereiche des Produktes nur wenig Wärme auf, da sie ein geringes Volumen haben. Die dicken Bereiche hingegen nehmen wegen ihres hohen Volumens auch viel Wärme auf. Dadurch ist der Wärmeeintrag in das Produkt viel günstiger als bei konventioneller Erwärmung, was in erheblich verkürzten Trocknungszeiten resultiert.

Insbesondere bei den qualitativ sehr hochwertigen, mit viel Handarbeit verbundenen Porzellanfiguren kann die durch die schnellere Trocknung ermöglichte Lieferzeitverkürzung einen bedeutenden Wettbewerbsvorteil darstellen.

Es hat sich auch gezeigt, daß die Rücktrocknung der Gipsformen mit Mikrowellen deutlich schneller realisiert werden kann. Dabei ist darauf zu achten, daß die Temperatur der Formen 60°C nicht übersteigt, da sich sonst der Gips chemisch verändert und nicht mehr als Form zu verwenden ist. Die Limitierung der Trocknungstemperatur führt bei konventioneller Trocknung zu entsprechend langen Trocknungszeiten.

Grundsätzlich trifft dies natürlich auch auf die Mikrowellentrocknung zu, durch den oben beschriebenen verbesserten Stofftransport bei Mikrowellenerwärmung ist jedoch auch bei den geringen Trocknungstemperaturen eine deutliche Steigerung der Trocknungsgeschwindigkeit möglich.

Im Druckgussbereich wird die Mikrowellentrocknung zur Lederharttrocknung von Sanitärkeramik wie z.B. Waschtischen eingesetzt. Die Druckgusstechnologie ermöglicht einen deutlich



(Bild 4, Mikrowellen Rollen Trockner für Waschtische)

beschleunigten Gießvorgang gegenüber dem Gießen in Gipsformen. Dieser Zeitvorteil kann je nach Prozeß aber nicht voll genutzt werden, da die anschließende konventionelle Lederharttrocknung nach wie vor viel Zeit benötigt. Alternativ wird viel Lagerplatz benötigt um den unterschiedlichen Takt von Gießen und Trocknen auszugleichen.

Um dieses Problem zu beseitigen wurde ein Mikrowellentrocknungsprozeß entwickelt, der die Lederharttrocknung in der gleichen Zeit durchführt die der Gießprozeß benötigt. Damit ist ein In-Line Betrieb möglich, wobei die fertig gegossene Charge direkt in den Mikrowellentrockner transportiert werden kann, während die vorherige Charge zur Putzstation gebracht wird. Siehe Bild 4.

Die Weißtrocknung von druckgegossener Sanitärkeramik mit Mikrowellen ist technisch problemlos realisierbar, jedoch aus prozesstechnischer Sicht weniger Interessant, da die Weißtrocknung auch mit Mikrowellen nicht in einem Takt realisiert werden kann und somit als Vorteil „nur“ die Verkleinerung der benötigten Trocknerfläche und evtl. Energieeinsparung möglich ist.

Fazit

Die in der Praxis realisierbaren Verbesserungen der Trocknungsgeschwindigkeiten von keramischen Produkten lassen sich mit der herkömmlichen Trocknungstheorie nicht erklären. Daher wurde ein Versuch unternommen eine Theorie der Mikrowellentrocknung aufzustellen. Diese Theorie ist jedoch nicht wissenschaftlich bewiesen und es bleibt nur zu hoffen, daß sich dies in absehbarer Zeit ändert.

In der industriellen Praxis hat die Mikrowellentrocknung begonnen sich in einigen Bereichen durchzusetzen, jedoch besteht noch viel Raum für Weiterentwicklung. Der anhaltende Druck zur Produktionsoptimierung und Energieeinsparung in der keramischen Industrie läßt dabei eine weitere Verbreitung der Mikrowellentechnik erwarten.

Literatur

[1] Salmang, H.; Scholze, H.; Keramik Teil 2: Keramische Werkstoffe, Springer Verlag, 1983

[2] Clark, D.E.; Microwave Solutions for Ceramic Engineers, The American Ceramic Society, 2005

[3] Starck, A. von; Handbook of Thermoprocessing Technologies, Vulkan Verlag, 2005