

Mikrowellentechnik zur schonenden Trocknung keramischer Materialien

J. Suhm



Npl.-Ing. Jürgen Suhm studierte an der TU Karlsruhe Maschinenbau, Fachrichtung Hochfrequenztechnik. Nach dem Diplom 1994-95 arbeitete er beim Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der TU Karlsruhe, seit 1996 ist er bei Linn High Therm GmbH tätig.

Kurzfassung

Die Mikrowellenerwärmung ist nun seit Jahrzehnten bekannt, konnte aber in der Technik bis jetzt nur in kleinen Bereichen Einzug halten. Der wesentliche Schritt in die breite industrielle Produktion fehlt jedoch. Die internationalen großen Forschungsaktivitäten und deren zum Teil viel versprechende Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich hinter der Mikrowellentechnologie ein enormes Potential verbirgt. Diese Möglichkeiten, die es nun zu nutzen gilt, können neue Prozesse und Verfahren generieren, so dass diese vereinfacht, verkürzt oder grundsätzlich erst ermöglicht werden. In der Keramikindustrie können z. B. die Trocknungszeiten deutlich verkürzt werden. Diese Techno-

logie kann zusätzlich in weiten Bereichen die Materialeigenschaften positiv verändern und eine bessere Produktqualität liefern. Wichtige Marktvorteile für Produzenten, Endverbraucher und Anwender können dadurch entstehen. Mit dem Mikrowellen-Banddurchlaufofen der MDBT-Reihe wurden bereits die ersten Erfolge erzielt und weitere sind in Aussicht. Der Anwendungsbereich dieses Ofens ist in erster Linie die Trocknung, bei der es mit konventionellen Methoden immer noch genügend Probleme gibt, beispielsweise die Trocknung von Isolationsmaterial oder keramischen Materialien.

Abstract: Microwave Technology for Gentle Drying of Sensitive Products

Although microwave heating is well known now for decades, however, for technical applications it has only been used in some small fields only. The substantial step towards general industrial production has not yet taken place. International research activities with their partially much promising results ensure that microwave technology bears an enormous potential. These possibilities, which can be used now, can generate new processes and procedures and thus these processes and procedures can be simplified, shortened or basically made possible.

For example in the ceramic industries the drying cycle could be very much shortened. Additionally, this technology can positively change material characteristics and improve product quality in many fields. Important market advantages for manufacturers, user and end-user may be the result. The microwave belt kiln in MDBT range has already been successfully tested and more success is expected. This kiln will mainly be applied in drying, where conventional methods still cause problems, for example, drying of insulation or ceramic materials.

Keram. Z. 52 (2000) [8]

1 Einleitung

Die Trocknung des fertigen Produktes bestimmt in manchen Prozessen die Produktionsdauer nachhaltig. Um den Ausstoß einer Anlage zu erhöhen, muss aber die Produktionsdauer verringert werden. Mit konventionellen Trocknungsverfahren ist eine Beschleunigung jedoch nur in engen Grenzen möglich. Abhilfe kann die Nutzung einer altbekannten Technik schaffen: der Mikrowelle. Die Trocknung mit Mikrowellentechnologie ist schnell und schon das Produkt. Sie wird sich daher in Zukunft ihren Platz unter den Trocknungsverfahren sichern. In der Keramikindustrie sind Trocknungszeiten von 1-2 Wochen keine Seltenheit. Ein entsprechender Trocknungsraum muss eine Menge an Material aufnehmen können, um die Produktion abzudecken. Eine Trocknungsdauer von wenigen Stunden oder 1-2 Tagen wäre daher sehr hilfreich.

Die Mikrowellenerwärmung ist eine Technologie, die seit Jahrzehnten bekannt ist. Sie wurde von einem Radartechniker entdeckt, der zufällig seine Mahlzeit im Strahlungsfeld des Radarsenders liegen gelassen und dann bemerkte hatte, dass diese sich erwärmte. Die Idee für den ersten Mikrowellenofen war geboren. Anfang der 90er Jahre begann die Firma Linn High Therm GmbH ihre Aktivitäten auf dem

Gebiet der Mikrowellenerwärmung. Um dem Bedarf an Industrietrocknern nachzukommen, wurde der Mikrowellen-Banddurchlaufofen MDBT entwickelt.

Die Trocknung hat eine besondere Stellung im Produktionsprozess und bestimmt in einigen Fällen sogar die Produktionsrate bzw. -dauer. Bei einer Optimierung des ganzen Prozesses wird daher oft der Trocknungsvorgang unter die Lupe genommen. Da kürzere Lieferzeiten und niedrigere Lagerkapazitäten angestrebt werden, wird die Mikrowellentrocknung eine immer wichtigere Rolle einnehmen. Der Grund dafür liegt in der Physik der Mikrowellentechnik bzw. in der Ausbreitung und den Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen. In speziellen Fällen kann mit Hilfe der Mikrowelle sogar eine Materialverbesserung erzielt werden.

2 Konventionelle Trocknung kaum zu beschleunigen

Bevor auf das physikalische Prinzip der Mikrowellentechnik näher eingegangen wird, wird der konventionelle Erwärmungsprozess kurz betrachtet. Als Wärmequellen dienen z. B. Gas-, Widerstands- oder Infrarotbeheizelemente, die sich in der direkten Um-

gebung des zu erwärmenden Materials befinden. Über Wärmestrahlung und -konvektion wird ihre Energie auf die Oberfläche des Materials aufgebracht und muss von dort in das Innere wandern, um eine gleichmäßige Erwärmung des Materials zu ermöglichen. Die Wärmeleitfähigkeit und die Hitzebeständigkeit des Materials bestimmen hierbei im Wesentlichen den Erwärmungsprozess. Empfindliche Materialien erlauben unter Umständen keine hohen Temperaturen. Weist das Material zudem noch eine schlechte Wärmeleitfähigkeit auf, ist eine lange Trocknungsdauer unausweichlich, so dass bei der Herstellung bestimmter Produkte mit den konventionellen Wärmetechniken der Beschleunigung des Trocknungsvorganges enge Grenzen gesetzt sind.

Bei der konventionellen Trocknung von Keramik ist eine lange Trocknungszeit notwendig, um eine Rissbildung zu vermeiden. Um diese Grenzen zu umgehen, muss nicht die Physik neu erforscht werden, sondern nur die „Radio- bzw. Radartechnik“ eine größere Beachtung finden. Die Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen, wie sie auch in der Radio-, Fernseh- und Radartechnik zum Einsatz kommen. Der Unterschied liegt in der Frequenz und in der Leistungsdichte. Beim UKW-Rundfunk wird z. B. der Frequenzbereich von 88 bis 108 MHz genutzt. Mobiltelefone nutzen höhere Frequenzen, wie z. B. ca. 1900 MHz, wobei die Sendeleistung ca. 2 W beträgt.

$$\epsilon_r = \epsilon' - j \epsilon'' \quad ; \quad \tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad ; \quad \epsilon = \epsilon' - j \cdot \epsilon'' \quad (1)$$

- ϵ_r = relative Dielektrizitätszahl
- $\tan \delta$ = Verlustfaktor
- ϵ = komplexer Dielektrizitätskoeffizient (DK)
- ϵ' = Realteil des DK
- ϵ'' = Imaginärteil des DK

In der Mikrowellentechnik stehen zur Erwärmung im Wesentlichen drei Frequenzen zur Verfügung, die je nach länderspezifischen Regeln auch von den angegebenen Werten etwas abweichen können. Die höchste Frequenz ist 28 bzw. 30 GHz. Ein industrieller und kostengünstiger Einsatz dieser Frequenz in größerem Maßstab ist derzeit noch nicht in Sicht. Die niedrigere Frequenz von 915 MHz unterliegt einem gewissen technischen Aufwand, der nur für bestimmte Fälle einen Einsatz rechtfertigt. Die Frequenz, die am preiswertesten technisch umzusetzen ist, liegt bei 2,45 GHz. Diese wird jetzt schon weltweit in riesiger Stückzahl in Form von Haushaltsmikrowellengeräten genutzt.

Elektromagnetische Energie wird auf Grund der entsprechenden Eigenschaften der Materialien in Wärmeenergie umgewandelt. Diese Umwandlung ist prinzipiell von Material, Temperatur und Frequenz abhängig. Da in der Regel jedoch nur eine Frequenz beim Erwärmungsprozess verwendet wird und die Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften nicht bekannt ist, wird meist nur die Materialabhängigkeit betrachtet. Um ein beliebiges Material zu beschreiben, sind dazu die drei Parameter – Leitfähigkeit, Permeabilität und Permittivität oder Dielektrizitätskoeffizient – nötig. Für letzteres wird häufig auch noch die alte Bezeichnung Dielektrizitätszahl und

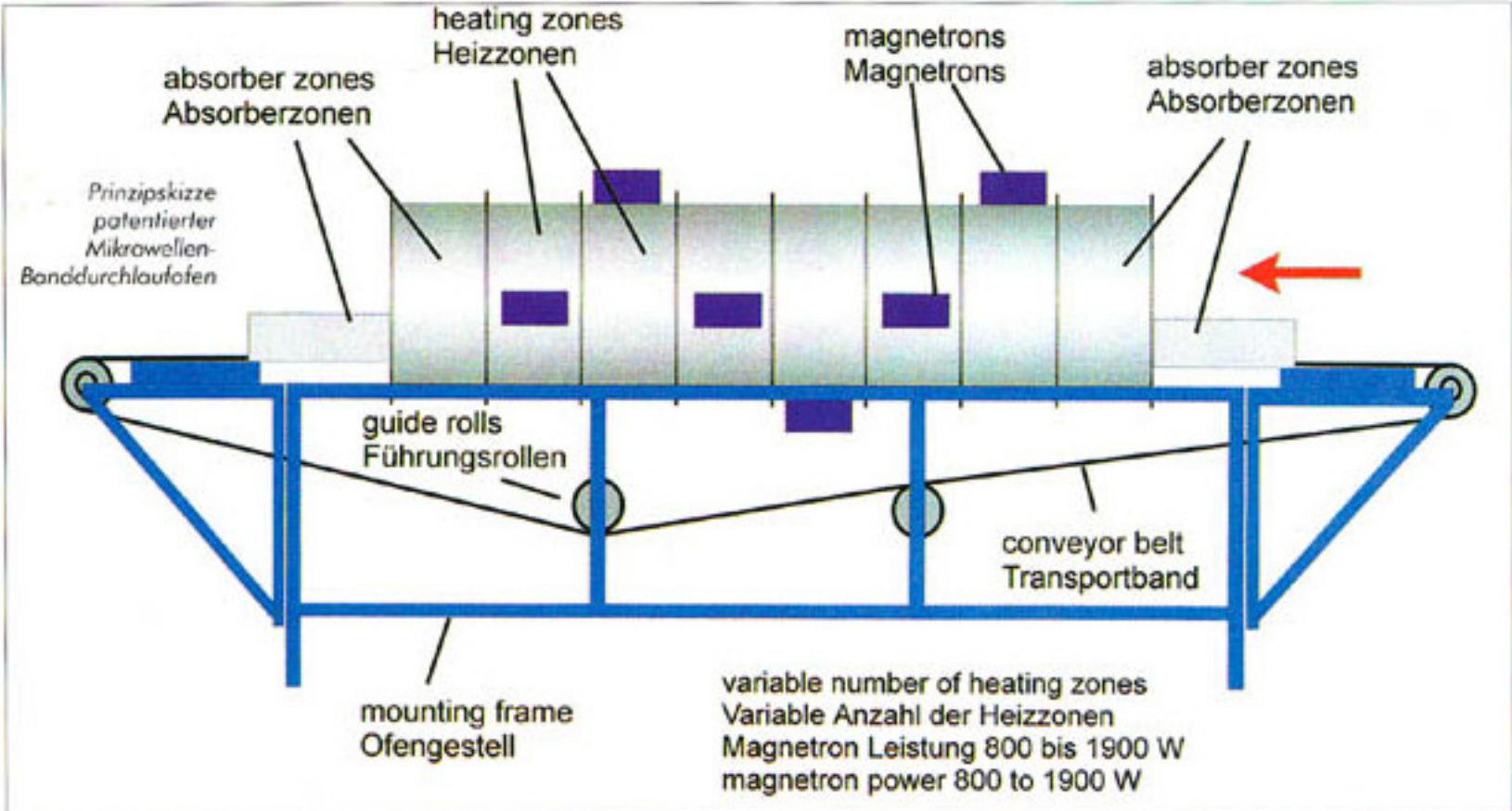
$$P / V = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot E^2 + \sigma \cdot E^2 \quad (2)$$

- σ = Leitfähigkeit
- ω = $2 \times \pi \times f$
- f = Betriebsfrequenz
- ϵ_0 = elektrische Feldkonstante
- ϵ'' = Imaginärteil des DK
- V = Volumen des Materials
- E = elektrische Feldstärke
- P = aufgenommene Leistung

Der entscheidende Faktor für die Energieumwandlung ist der Imaginärteil des Dielektrizitätskoeffizienten (= Verlustfaktor \times Dielektrizitätszahl), fälschlicherweise wird dieser oft mit dem Verlustfaktor gleichgesetzt. Der Zusammenhang ist aus Gleichung (1) ersichtlich. Das Wassermolekül ist aufgrund seines Winkels zwischen den Atomen polar, so dass eine Erwärmung durch Mikrowellen leicht möglich ist. Das polare Molekül wird hierüber durch das hochfrequente Wechselfeld in Rotation versetzt, wobei sich die Moleküle aneinander reiben und somit die elektromagnetische Energie in Wärme umwandeln. Da nun jedes Molekül Wärme umsetzt und die Mikrowellen auch genügend tief in den Körper bzw. das Produkt eindringen, wird das ganze Volumen aufgeheizt. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber der konventionellen Erwärmung, bei der die Wärme nur über die Oberfläche des Materials in den Körper eindringen kann und somit eine gewisse Wärmeleitfähigkeit vorhanden sein muss, um eine vernünftige Aufheizung zu erhalten. An dieser Stelle wird deutlich, dass für die Mikrowellenerwärmung nicht unbedingt eine Wärmeleitfähigkeit notwendig ist, da es sich um eine Volumenaufheizung handelt. Der Formalismus, der diesen Vorgang beschreibt, ist in Gleichung (2) dargestellt, wobei dieser nur für unmagnetische Materialien gilt [1]. Dieser Vorteil bewirkt nun bei dem Trocknungsprozess in der Keramik eine gleichmäßigere Erwärmung und somit auch eine gleichmäßigere Trocknung, wobei die Wärmeleitfähigkeit eine geringere Rolle spielt.

3 Volumenaufheizung statt Oberflächenerwärmung

Da das ganze Volumen des Körpers gleichzeitig erwärmt wird, baut sich im Inneren eine höhere Temperatur auf, weil die Oberfläche an die „kalte Umgebung“ angrenzt und somit gekühlt wird. Das Innere wirkt aber Wärme isolierend, da die Nachbarmoleküle dieselbe Temperatur aufweisen. Der Temperaturverlauf ist somit invers zu dem der konventionellen Erwärmung. Dieser Effekt ist oft erwünscht, da die Oberfläche geschont wird und die Wärme im Inneren schneller aufgebaut werden kann. Die Mikrowellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Wird die Mikrowellenquelle eingeschaltet, dringt die Energie unmittelbar in den zu erwärmenden Körper ein. Dort beginnt sofort ihre Umwandlung. Beim Abschalten wird der Aufheizvorgang sofort gestoppt. Lange Aufheiz- und Abkühlzeiten des Ofens gibt es nicht. Unpolare Stoffe, wie z. B. Luft, Teflon oder Quarzglas können keine Energie umwandeln und somit auch keine verbrauchen. Die Mikrowellen durchdringen diese Stoffe, ohne abgeschwächt zu werden. Man kann



ell kann aber von einer deutlich kürzeren als der „konventionellen“ Trocknungszeit gesprochen werden.

4 Inverses Temperaturprofil für höhere Trocknungsqualität

Bei der Mikrowellentrocknung ist das inverse Temperaturprofil von Vorteil, da sich im Inneren des Materials ein höherer Dampfdruck aufbaut, und die Trocknung von innen nach außen erfolgt. An der kälteren Oberfläche kondensiert ein Teil des Dampfes und hält die Oberfläche feucht, bis von innen kein Dampf mehr nachkommen kann. Anschließend beginnt die Oberfläche zu trocknen. Da das Wasser in der Regel die meiste Energie umwandelt, wird, je nach Trockensubstanz und Trocknungsgrad, im Inneren eine geringere Energiemenge umgewandelt, die Mikrowellen wandern ungeschützt weiter. Diese Energie kann an anderer Stelle genutzt werden. Somit ist eine effektive Trocknung mit Ausrottung aller Wassernester möglich. Durch die unterschiedliche Energieaufnahme der zu trocknenden Materialien sind prinzipiell auch unterschiedliche Prozessabläufe möglich, wobei oberhalb eines Feuchtegehaltes von etwa 15 % kein wesentliches Unterschreiten mehr besteht. Unterhalb von 15 % kann die Mikrowellentrocknung mit abnehmendem Feuchtegehalt, je nach zu trocknendem Material, uneffektiv werden. Hier spielt die Trockensubstanz selbst eine zunehmende Rolle. Ist das Material in der Lage Mikrowellenenergie umzusetzen, kann die Temperatur des Materials ansteigen, wobei die Temperaturabhängigkeit des Dielektrizitätskoeffizienten den Verlauf bestimmt. Für die Keramik-trocknung ist das Material der entscheidende Faktor. Eine Trocknung, die bis zu einem geringen Prozentsatz erfolgen kann, darf nicht zu schnell realisiert werden, da eine starke Verdampfung das Material schädigt. Mittels der Mikrowellentrocknung kann somit nur eine Trocknungsgeschwindigkeit erreicht werden, die von dem Material zugelassen wird. Prinzipi-

5 Regel zur Auslegung: 1 kW verdampft 1 kg Wasser/h

Bei der Mikrowellentrocknung kann zur Bestimmung der erforderlichen Leistung eine Faustregel angewendet werden, die besagt, dass zur Verdampfung von 1 kg Wasser pro Stunde eine Mikrowellenleistung von 1 kW notwendig ist. Diese Regel ist gültig, solange eine ausreichende Anfangsfeuchtigkeit gegeben ist. Für die Trocknung kann beispielsweise der patentierte Mikrowellen-Banddurchlaufofen der MDBT-Baureihe verwendet werden (Bild). Bei diesem Ofen wurde ein modularer Aufbau gewählt, der es ermöglicht, den Ofen auch nachträglich ohne großen Aufwand auszubauen. Die Mikrowellengeneratoren (Magnetrons) sind spiralförmig um die Längsachse der Zylinderkammer angeordnet, so dass eine gleichmäßige Feldverteilung erreicht wird. Das Transportband wird über Bodenbleche geführt, die mit Sekundärstrahlern (Schlitzantennen) ausgestattet sind, so dass eine weitere Feldbeeinflussung (Konzentration) stattfindet. Die Ein- und Auslass-Öffnungen sind mit einem speziellen Absorbermaterial ausgekleidet, um die vorgeschriebenen maximalen Leckstrahlungsgrenzwerte zu unterschreiten. Je nach Größe der Öffnung werden zusätzliche Absorberzonen integriert, die eine weitere Reduzierung bewirken. Bei noch größeren Öffnungen werden zusätzliche Absorbervorhänge eingesetzt. Die verwendeten Magnetrons sind luftgekühlt, wobei die erwärmte Kühlluft in den Ofen einströmt und Feuchtigkeit aufnehmen kann. Die feuchte Luft wird über ein Absaugsystem aus dem Ofen abgesaugt. Dieser Mikrowellen-Banddurchlaufofen kann mit einer Mikrowellenleistung bis zu 100 kW ausgestattet sein. Für spezielle Anwendungen kann der Prozess auch in einem Batchofen durchgeführt werden.

Literatur

[1] R. J. Meredith, A. C. Metaxas: Industrial Microwave Heating. London 1983

Linn High Therm GmbH, Heinrich-Hertz-Platz 1, D-92275 Eschenfelden