

# Mikrowellen zur Maistrocknung

*Der Trend von Trocknern geht zu immer größeren Einheiten. Dabei stoßen konventionelle mit Warmluft betriebene Systeme und hier insbesondere solche für Körnermais an ihre Leistungsgrenzen. Eine Abhilfe aus dieser Situation bietet die Erwärmung mit Mikrowellenenergie, die zusätzlich zu den konventionellen Verfahren eingesetzt werden kann. Sie wird auch die Leistungsdaten von Trocknern verbessern können. Der verfahrenstechnische Ablauf der Körnermaistrocknung wird im Labormaßstab untersucht, um aus dessen Ergebnissen den potenziellen Applikationsort in der Trocknungsanlage und den Zeitpunkt für die Mikrowellenzufuhr zu bestimmen.*

Dipl.-Ing. Markus Böckelmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Agrartechnik (Leitung: Prof. Dr. sc. agr. Wolfgang Lücke) der Georg-August Universität Göttingen, Gutenbergstraße 33, 37075 Göttingen; e-mail: M.Boeckelmann@t-online.de

Prof. Dr.-Ing. Reinald-Jörg Weimar leitet das Institut für Technologie und Wissenstransfer (TWS) im Kreise Soest e.V., Lübecker Ring 2, 59494 Soest; e-mail: weimar@fh-swf.de

## Schlüsselwörter

Hochfrequenz, Mikrowellentechnik, Trocknung mit Mikrowellenunterstützung

## Keywords

High frequency, microwave technology, drying with microwave support

## Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 05421 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/localliteratur.htm> abrufbar.

Die Mikrowellen- oder dielektrischen Eigenschaften sind in elektrisch nicht leitenden oder schlecht leitenden Stoffen grundsätzlich vorhanden. Sie sind stoffspezifisch. Die Grundlage hierfür sind elektrische Dipole.

Eine andere Art sind die sogenannten permanenten Dipole. Bei ihnen sind bereits ohne ein äußeres Feld die Ladungen räumlich voneinander getrennt, wie es zum Beispiel bei Wasser der Fall ist.

Unter dem Einfluss der Kraftwirkungen des elektrischen Wechselfeldes bewegen sich die Dipole und erzeugen Wärme. Die Wärmeerzeugung ist von der Höhe der angelegten Frequenz abhängig.

Die dipolare oder Molekül-Polarisation oder auch Orientierungspolarisation findet bei Frequenzen im Hochfrequenz/Mikrowellen-Bereich statt. Aufgrund ihrer Masse und Bindung im Molekül folgen die Ladungsträger einer Feldänderung zeitlich später. Bei hohen Anregefrequenzen können nur Ladungsträger mit geringer Masse angesprochen werden, während niedrige Frequenzen alle Ladungsträger ansprechen.

Die  $\epsilon''$ -Kurven stellen den Verlauf der Energieabsorption als Funktion der Frequenz dar. Bei dem maximalen Wert von  $\epsilon''$  liegt die höchste Energieabsorption vor. Die Frequenz, bei der  $\epsilon''$  sein Maximum erreicht, nennt man auch Relaxationsfrequenz. Für Wasser liegt dieser Wert bei  $f = 22$  GHz, verbunden mit einer sehr geringen Eindringtiefe, was nicht erwünscht ist. Deshalb ist auch von der trocknungstechnischen Seite her betrachtet die verwendete Mikrowellenfrequenz von  $f = 2,45$  GHz geeignet, weil sie eine größere Eindringtiefe aufweist.

Die Absorption von Mikrowellenenergie wird mit folgender Gleichung beschrieben:

$$P_{\text{HF}} = E^2 \cdot 2\pi f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' \cdot V = E^2 \cdot 2\pi f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' \cdot \tan\delta \cdot V \quad [\text{W}] \quad (1)$$

Die absorbierte Mikrowellenenergie wird in dem betrachteten Volumen  $V$  vollständig in Wärme umgewandelt.

Zu den Mikrowelleneigenschaften gehört auch der Begriff der Eindringtiefe. Er ist definiert als die Tiefe, bei der die an der Produktoberfläche ankommende Leistung im Produktinnern auf den  $1/e$ -ten Teil gesunken ist. Er ist von der Frequenz und den dielektrischen Stoffwerten abhängig [6].

## Abkürzungen

$P_{\text{HF}}$	= absorbierte Leistung, in Wärme umgewandelt [W]
$E$	= elektrische Feldstärke [V/cm]
$f$	= Frequenz [ $\text{s}^{-1}$ ]
$c_0$	= Lichtgeschwindigkeit = $3 \cdot 10^8$ m/s
$d$	= Eindringtiefe
$\epsilon_0$	= dielektrische Feldkonstante = $8,85 \cdot 10^{-14}$ [As/V cm]
$\epsilon_r', \epsilon_r''$	= Realteil der komplexen Permittivität, charakterisiert die reine Polarisation
$\epsilon_r'', \epsilon_r''$	= Imaginärteil der komplexen Permittivität = dielektrischer Verlustwert
$\tan \delta$	= $\epsilon_r'' / \epsilon_r'$ = Verlustfaktor (Tangens des dielektrischen Verlustwinkels) charakterisiert die bei der Umpolarisation entstehenden Verluste
$\omega_m$	= Kreisfrequenz bei der der dielektrische Verlustwert maximal ist (Relaxationsfrequenz)
$V$	= Volumen [ $\text{cm}^3$ ]
$m_{\text{H}_2\text{O}}$	= Masse des entzogenen Wassers
$m_{\text{Nassmais}}$	= Masse des zu trocknenden Gutes
$F_A$	= Anfangsfeuchtegehalt in %
$F_E$	= Endfeuchtegehalt in %

$$d = \frac{c_0}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \left( \left\{ 2 \cdot \epsilon_r' \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \right)^2 \right]^{0,5} - 1 \right\}^{-1} \right)^{0,5} \quad [\text{m}]$$

Insbesondere zeigt sie, dass die Eindringtiefe mit steigender Frequenz ausgehend von der Oberfläche ins Körperinnere kleiner wird.

Die beiden Gleichungen (1) und (2) legen dar, wie man eine geeignete Frequenz wählen kann. Auf der einen Seite möchte man eine hohe Mikrowellenleistung in das Produkt zur Wärmeerzeugung haben, was man gemäß der Gleichung (1) durch eine hohe Frequenz in der Nähe der Relaxationsfrequenz und hohe Feldstärke erreicht. Die Verringerung der Eindringtiefe mit steigender Frequenz führt zu hohen Temperaturen und damit zu einer eventuellen Schädigung des Stoffes. Die Erwärmungsvorgänge mit der Mikrowelle sollen ein großes Volumen überstreichen, weil dieser Vorgang schnell geschieht und weniger durch die konventionelle Wärmeausbreitung. Die zu behandelnden Produkte haben ein geringes Wärmeleitvermögen, so dass der Erwärmungsvorgang insgesamt unerwünscht langsamer verläuft. Die technische Grenze ist durch die Durchschlagfestigkeit der Luft gegeben.

## Aufbau der Versuchsanlage

Die Untersuchungen wurden an einem für Laboruntersuchungen umgebauten Haushalts-Mikrowellegerät durchgeführt. Das vorhandene Magnetron wurde durch ein leistungsstärkeres ersetzt. An der vorhandenen Mikrowelleneinspeisung wurde ein Hohlleiter mit Magnetronkopf angebracht. Der Magnetronkopf enthält neben dem Magnetron und Einspeisehohlleiter den Heiztransformator, den Lüfter sowie einen Temperaturschalter. Dieser lässt bei Übertemperatur die Anodenspannung abschalten.

Zwischen dem Magnetronkopf und der Einspeisung in den Arbeitsraum befindet sich zum Schutz des Magnetrons gegen zurücklaufende Mikrowellen eine wassergekühlte Einwegleitung. Die in dem Arbeitsraum vorhandene Umluftheizung und Infrarotheizung wurde für Trocknungsversuche um eine Durchluftheizung ergänzt.

Ein an einer Seitenwand angebrachtes Rohr enthält eine Heizung mit Gebläse, an der gegenüberliegenden Seite des Arbeitsraumes über die Raumdiagonale liegt die Austrittsöffnung ebenfalls mit Gebläse.

Das gesamte System ist in zwei fahrbaren Schränken untergebracht (Bild 1). Der eine Schrank enthält den Mikrowellenteil mit den Regeleinrichtungen für Umluft, Durchluft und Infrarot. In der anderen Einheit ist die Energieversorgung für die Mikrowelle untergebracht. Außerdem befindet sich dort die Auswertelektronik für die Feuchtemessung. Zur Vorgabe der Impuls-Pausenzeiten für die Mikrowelle wird eine Schaltuhr verwendet.

Das System wird mit Drehstrom versorgt, als zusätzliche Schutzmaßnahme dient ein Fehlerstromschutzschalter mit einem Differenzstrom von 30 mA.

Die Energieversorgung des Magnetrons ist stromgeregelt. Mit einem Potentiometer kann die Leistung zwischen 0 und 100 % eingestellt werden.

## Trocknung von Körnermais

Für den Versuch wurden 500 g Körnermais verwendet, der in einem offenen Glasgefäß platziert wurde, dass Mikrowellenenergie nicht absorbiert (keine Eigenerwärmung des Gefäßes). Der Anfangsfeuchtegehalt von 25 % wurde mit einem Verfahren der kapazitiven Messung ermittelt. Die in den Arbeitsraum abgegebene Mikrowellenleistung betrug 600 W.

Der Körnermais war jeweils für eine Minute der Mikrowellenbehandlung ausgesetzt. Die Oberflächentemperatur wurde an fünf verschiedenen Stellen mit einem Infrarot-Thermometer gemessen und daraus der arithmetische Mittelwert gebildet. Anschlie-



Bild 1: Ansicht des Mikrowellen-Chargenofens

Fig. 1: View of the microwave batch type

ßend wurde der Körnermais an Umgebungsluft gerührt, sein neues Gewicht ermittelt und die Oberflächentemperatur wieder gemessen. Der Versuch wurde beendet, nachdem der Endfeuchtegehalt von etwa 13,5 % erreicht worden war. Der hierzu notwendige Wasserentzug ist mit Hilfe der Duval'schen Formel - ausgehend von dem Anfangsfeuchtegehalt - bestimmt worden.

$$m_{H_2O} = m_{Nassmais} \cdot \{(F_A - F_E) / (100\% - F_E)\} \quad (3)$$

## Versuchsergebnisse

Der Versuch zur Trocknung von Körnermais nur mit Mikrowellenenergie (Bild 2), zeigt einen typischen Trocknungsverlauf von ka-

pillarporösen Stoffen. Ihm fehlen deswegen die aus der Trocknung von kapillarporösen-hygroroskopischen Materialien bekannten Knickpunkte. Der Wassergehalt nimmt nach einer Anfangsphase relativ konstant ab. Die Oberflächentemperatur unmittelbar nach der jeweiligen Mikrowellenbehandlung bleibt annähernd konstant, um dann ab einem bestimmten Wassergehalt (15. Minute) anzusteigen. Als Rechtecke eingetragen sind die je Zeiteinheit entzogenen Wassermengen. Ab der 16. Minute wurde in Zwei-Minutenabständen gemessen. Nach 22 Minuten Applikationszeit ist der Endfeuchtegrad erreicht. Im Ergebnis zeigt sich, dass Körnermais wegen seines hohen Anfangsfeuchtegehaltes und aufgrund seines physiologischen Aufbaues gut zum Trocknen mit Mikrowellenenergie geeignet ist. Eine direkte Übertragbarkeit der hier vorgestellten Ergebnisse auf große Anlagen ist nur bedingt möglich. Die physikalischen und technischen Eigenheiten des konventionellen und Mikrowellensystems müssen feinfühlig aufeinander abgestimmt werden, um die jeweiligen Verfahrensabläufe und Stoffeigenschaften optimal miteinander verbinden zu können. Um die Wechselwirkungen innerhalb des Gesamtsystems Trocknung beschreiben und damit für Großanlagen anwenden zu können, sind weitere Versuche im Technikummaßstab und größer notwendig.

Bild 2: Trocknungsverlauf von Körnermais im Mikrowellenofen; Eingangsfeuchte: 25 %, Ausgangsfeuchte 13,5 %

Fig. 2: Course of drying maize in microwave oven; initial moisture: 25 % w.b., end moisture: 13,5 % w.b.

