

Der Einsatz von Mikrowellen zur Maistrocknung – Anwendungen im Technikumsmaßstab

Markus Böckelmann^{1*}, Wolfgang Lücke¹, Reinald-Jörg Weimar² und Dieter von Hörsten¹

¹ Georg-August Universität Göttingen, Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Agrartechnik, Gutenbergstraße 33, 37075 Göttingen, Germany

² Institut für Technologie- und Wissenstransfer, Lübecker Ring 2, 59494 Soest, Germany

Received 15 December 2006; accepted 8 June 2007

Kurzfassung - Abstract

Konventionelle Warmlufttrocknungssysteme für die Körnermaistrocknung sind technisch weitgehend ausgereift, wobei aus der Praxis möglichst hohe Trocknungsleistungen bei geringen Trocknungskosten gefordert werden. Im Hinblick darauf wird untersucht, wie sich durch eine Verfahrenskombination aus Warmlufttrocknung und Mikrowellenapplikation Prozesse der Körnermaistrocknung optimieren lassen. Hierzu sind Versuche im Technikumsmaßstab durchgeführt worden. Mit Infrarotaufnahmen wird mikrowellenbedingte Körnerwärmung verdeutlicht. Die Ergebnisse zeigen auf, dass im Vergleich zur reinen Warmlufttrocknung eine kombinierte Trocknung zu einer Verringerung der Trocknungsdauer von 35 % führt, wobei sich der spezifische Trocknungsenergiebedarf um 22 % reduziert.

Schlüsselwörter: Warmlufttrockner, Körnermais, Mikrowelle

Application of microwaves for dehydration of maize - Implementation in pilot plant scale

Conventional warm air drying systems for maize dehydration are now largely well-engineered. The current objective in practice is to maximize the dehydration achievement at minimal cost. With this in mind, the paper analyses how maize dehydration processes can be optimized with a combination of warm-air-dehydration and microwave application. For this purpose laboratory tests were conducted in a pilot plant scale. Infrared photos show the warming of the corn caused by microwave application. The results show that such combined dehydration reduces drying time by about 35 % compared with pure warm-air dehydration, while the specific dehydration energy demand decreases by about 22 %.

Keywords: Thermal dryer, maize, microwave

1 Einleitung

Die rechtzeitige und schonende Konservierung von Körnermais und anderen landwirtschaftlichen Körnerfrüchten stellt angesichts weltweit hoher Verluste an Nahrungsmitteln im Nacherntebereich eine bedeutende Aufgabe für die agrartechnische Forschung dar. Vor dem Hintergrund, dass landwirtschaftlich erzeugte Rohstoffe zunehmend als Basis verwertbarer Grundwerkstoffe in der Industrie, Energie- oder Medizintechnik eingesetzt werden, gewinnt der Einsatz an die spätere Verwendung angepasster Trocknungsverfahren zunehmend an Bedeutung (Mellmann et al. 2005, Münzing 1995).

Im Gegensatz zur reinen Warmlufttrocknung besteht durch die Applikation von Mikrowellen eine grundsätzlich andere Möglichkeit den Energieeintrag in das Trocknungsgut durchzuführen. Hierbei wird die physikalische Eigenschaft genutzt, dass die Energie direkt in den Wassermolekülen in Wärme umgesetzt wird. Die Mikrowellenenergie wirkt im Innern des Trocknungsgutes, ohne dass diesem Effekt eine auch hierauf beruhende Wärmeübertragung von der Kornschale

zum Korninnern zwingend vorausgeht. Hierdurch wird in aller Regel der Entfeuchtungsvorgang erheblich beschleunigt (Lücke 2006).

Die derzeit marktgängigen Trocknungssysteme stellen in Bezug auf die Wasserabgabefähigkeit des Körnermaises dem Produkt stets ein überhöhtes Energieangebot zur Verfügung, um den erforderlichen Dampfdruck zum Austritt des Wassers aufzubauen. Der notwendige Energieeintrag in das Produkt wird über dieses Kriterium bestimmt (Metaxas & Meredith 1983). Ziel ist es, möglichst kurze Trocknungszeiten zu erreichen. Feuchtes Getreide oder auch feuchter Mais reagieren empfindlicher auf hohe Korntemperaturen als trockene Ware (Beke 1997, Mühlbauer 1972). Die Gleichmäßigkeit der Korntemperatur in zu trocknenden Produktschüttungen ist für eine homogene und möglichst zügige Trocknung wichtig. Je höher der Energieeintrag in das Trocknungsgut ist, desto größer muss die Kornbewegung der Maisschüttung sein, um der Gefahr lokal hoher Korntemperaturen entgegenzuwirken (Krischer & Kast 1978).

Während der Trocknung innerhalb des ersten Trock-

* Corresponding author. Tel: ++49 (0) 251 928 40 80; Fax: ++49 (0) 251 928 40 81; E-mail: m.boeckelmann@t-online.de

nungsabschnittes sind bei feuchtem Körnermais hohe Warmlufttemperaturen möglich. Sobald der Wärmeintrag und der daraus folgende Feuchtigkeitsaustausch aus dem Korn nicht mehr gleichgewichtig erfolgen, können Überhitzung und Kornschäden auftreten. Dieser Effekt lässt sich nur dadurch mindern, indem die Warmlufttemperatur verringert bzw. an die jeweiligen Trocknungsverhältnisse angepasst wird. (Maltry et al. 1975, Skriegan 2005, Toftdahl 1987).

Durch Wärmeleitung wird die zur Trocknung notwendige Energie von der Produktoberfläche ins Innere geleitet, die Wärmeleitfähigkeit des Stoffes ist von seinen thermischen Eigenschaften und seinem Feuchtegehalt abhängig. Die Wärmeleitfähigkeit verschlechtert sich mit geringer werdender Gutfeuchtigkeit. Durch Feuchteleitung erfolgt der Transport der Flüssigkeit aus dem Innern des Trocknungsgutes zur Oberfläche. Die Feuchteleitfähigkeit hängt von der Struktur der Feststoffmatrix ab und ist damit gutcharakteristisch. Die Transporteigenschaften für die Feuchte werden durch den Kapillardruck bestimmt, der mit abnehmender Porengröße und mit abnehmendem Feuchtegehalt ansteigt (Gröber et al. 1963). Stofftransport in der gasförmigen Phase findet infolge von Dampfdiffusion statt, entscheidend für dessen Größe ist der Diffusionskoeffizient des Dampfes im Gas bzw. der Trocknungsluft und der Diffusionswiderstand des Feststoffes. Dieser Diffusionswiderstand ist vom Feuchtegehalt abhängig und nimmt mit abnehmendem Feuchtegehalt zu. Hierdurch können Diffusionsbarrieren an der Gutoberfläche entstehen, die die Trocknungszeit verlängern können.

Bei der Mikrowellentrocknung erfolgt im Gegensatz zur Warmlufttrocknung eine Verdampfung der Feuchtigkeit im Korninnern (Askeland 1996, Heindl 1993, Hippel von 1954). Die äußeren Schichten bzw. Schalen des Maiskorns bleiben bei einer Mikrowellenapplikation bis zum Ende des Trocknungsprozesses diffusionsfähig, weil der Feuchtetransport vom Korninnern an die Oberfläche nachgeführt wird (Böckelmann et al. 2007). Bei der Warmlufttrocknung erfolgt der Energieübergang stets von der Kornoberfläche aus, so dass diese Bereiche auch zuerst getrocknet werden. Die Wärme- und Feuchtedurchlässigkeit verringern sich. Zudem wird Warmluft benötigt, um das an die Kornoberfläche gelangte Wasser abzuführen (Kröll & Kast 1989).

In seinen Versuchen zur Mikrowellenapplikation an Möhrenscheiben hat Tarsa (1991) festgestellt, dass es aus ökonomischen Gründen angebracht ist, das leicht entfernbare Wasser durch Konvektionstrocknung zu entziehen, und erst später mit der Mikrowellenapplikation zu beginnen. Aufgrund der niedrigen Wassergehalte zum Trocknungsende wird die Mikrowellenenergie schlecht in Wärme umgewandelt. Die Endtrocknung ist daher vorteilhaft mit Konvektionsenergie abzuschließen, wobei kurzzeitige Mikrowellenim-

pulse die Trocknungsgeschwindigkeit erhöhen. Im Gegensatz zu einer unabhängig von der Schnittebene weitgehend offenporigen Struktur von Möhrenscheiben zeigen Maiskörner aufgrund ihres Aufbaues ein grundlegend anderes Wasserabgabeverhalten. Beim Maiskorn liegt das Wasser nicht nur in reiner Form, sondern auch als Nährlösung vor. Daher ist zur Entfeuchtung aus dem Maiskorn zusätzlich zur Verdampfungswärme die Bindungswärme zuzuführen, die von der Feuchtebindung abhängig ist. Beim Maiskorn liegt physikalisch-chemisch gebundene Feuchtigkeit und physikalisch-mechanisch gebundene Feuchtigkeit vor (Krischer 1992, Mühlbauer 1972). Sowohl aus den theoretischen Betrachtungen als auch an Trocknungsversuchen mit Kartoffelscheiben hat Lücke (1992) festgestellt, dass ergänzend zur Warmlufttrocknung eine Mikrowellenapplikation dann vorteilhaft wirkt, wenn die Einkopplung der Mikrowellenenergie sowohl konstruktiv technisch als auch im Sinne des Trocknungsverlaufes aufeinander abgestimmt ist. Es stellt sich daher die Frage, welche verfahrenstechnischen und konstruktiven Eigenschaften eines Trockners erforderlich sind, damit mit Mikrowellenenergie die Warmlufttrocknung vorteilhaft unterstützt werden kann.

2 Material und Methoden

2.1 Aufbau der Versuchsanlage

Der metallische Trockner besteht aus einem stehenden zylindrischen Mischer mit einem ebenen Lochboden (1,5 mm Lochdurchmesser), worunter sich der Abluftraum befindet (Abb. 1). Der Trocknungsraum hat einen Durchmesser von 0,45 m und eine Höhe von 0,50 m. Das entspricht einem Volumen von 0,08 m³. Im Gegensatz zu bekannten Behältertrochnungen wird die angewärmte Prozessluft oberhalb der Gutschicht durch



Abb. 1: Chargenmischertrockner

eine seitliche Zuluftöffnung eingesaugt und die Abluft unterhalb des Lochbodens von einem Radialgebläse abgeführt (Abb. 2). Durch die saugende Betriebsweise bleibt die Anlagenperipherie staubfrei und trocken, hingegen werden Abluftfeuchte, Abrieb oder Maisstaub direkt abgeführt (Ciesler 1986). In die Behälterwandung ist im Bereich des Zuluftanschlusses ein Edelstahlgitter (1,5 mm Lochdurchmesser) eingearbeitet, so dass die Warmluft nahezu stränenfrei in den Trocknungsraum einströmt (Matthis 1956). Gleichzeitig hat das Edelstahlgitter die Aufgabe, den Austritt von Mikrowellen nach außen zu verhindern. Im Ergebnis ist ein absätzig arbeitender, so genannter Chargenmischertrockner konzipiert worden. Auf diese Weise ist es möglich, alle während der Trocknung relevanten Prozesszustände separat einzustellen und zu bilanzieren.

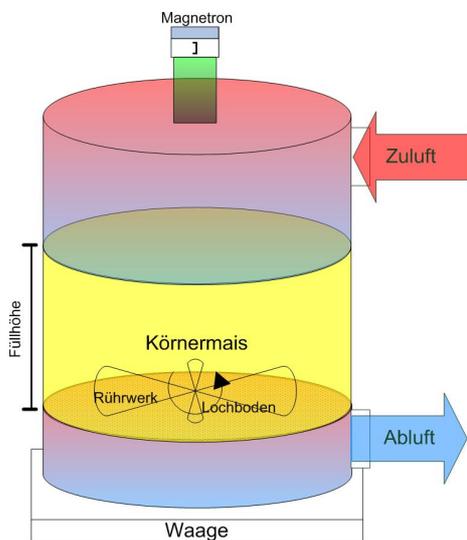


Abb. 2: Aufbau des Chargenmischertrockners

Der Chargenmischertrockner verfügt über zwei austauschbare Abdeckungen. Mit Hilfe eines hitzebeständigen Glasdeckels lässt sich der Trockner als reiner Warmlufttrockner betreiben, wobei sich während des Trocknungsvorganges die Veränderungen von Volumen, Farbe und Fließverhalten des Trocknungsgutes gut beobachten lassen. Der zweite Deckel besteht aus einer Metallscheibe, auf dem exzentrisch der Hohlleiter mit einem aufgesetzten Industriemagnetron mit 1200 W Sendeleistung bei einer Frequenz von 2,45 GHz positioniert ist. Die Sendeleistung ist zwischen 120 und 1200 W Hochfrequenz stufenlos regelbar. Das verwendete Magnetron hat einen Wirkungsgrad von ca. 70 %, daraus ergibt sich eine elektrische Aufnahmeleistung von 1800 W. Die Abwärme des Magnetrons wird bei diesem Trockner technisch nicht weiter verwertet. Im industriellen Mikrowelleneinsatz lassen sich in der Regel ca. 50 % der Abwärme verfahrenstechnisch sinnvoll nutzen (Püschner 1964). Durch ein frequenzgesteuertes Radialgebläse lässt sich

ein Prozessluftstrom zwischen 30 bis 350 m³ pro Stunde einstellen. Das entspricht einer spezifischen Trockenluft rate von 380 bis 4800 m³ Prozessluft je Kubikmeter Trockengut und Stunde (Kröll & Kast 1989, Maltry et al. 1975, Zscheischler et al. 1990). Die Trocknungsluft wird über zwei in Reihe angeordnete elektrisch betriebene Widerstandsheizregister mit je 1700 W erwärmt, wobei die Warmlufttemperatur von einem PID-Regler stufenlos zwischen der Umgebungstemperatur und 200 °C einstellbar ist. Für die Energiebilanzierung der Trocknungsversuche sind die elektrische Energieaufnahme der Warmluftherzeugung und der dielektrischen Erwärmung durch getrennte Energiezähler erfasst worden.

Während der Trocknung wird das Trocknungsgut durch eine motorisch angetriebene Rührwelle mit 10 Umdrehungen pro Minute von zwei Rührarmen durchmischt. Dadurch ist eine homogene Produktverteilung während der Trocknung gegeben. Die Einschaltzeiten des Rührwerkes können mit einem Arbeitszeit-Pausenrelais stufenlos verstellt werden. Im Betriebszustand ist der Trockner auf einer digitalen Waage mit einer Auflösung von 0,050 kg positioniert, so dass die Gewichtsänderung des Trocknungsgutes durch die Wasserabgabe kontinuierlich aufgezeichnet werden kann.

2.2 Versuchsdurchführung

Bei den Versuchen zur Körnermaistrocknung hat sich bei dieser Anlage eine Chargengröße zwischen 10 und 30 kg bewährt. Dieses entspricht einer prozentualen Trocknerausnutzung von ca. 18 bis 55 %. Durch eine in Abhängigkeit der Befüllhöhe einstellbare Durchströmung der Schüttung lassen sich unterschiedliche Strömungsverhältnisse erfassen (Martinez 2001). Die Trocknerkonstruktion ist so ausgeführt, dass die Wirkrichtung der zuschaltbaren Mikrowelleapplikation mit dem Luftstrom gleichgerichtet ist. Zur Energie- und Leistungsbilanzierung werden während des Trocknerbetriebes folgende Messdaten erfasst:

- Systemgewicht (Probengewicht nach Tara-Abzug)
- Temperatur, Feuchtegehalt und Strömungsgeschwindigkeit der Zu- und Abluft
- Trocknungsguttemperatur (nur bei Warmlufttrocknung möglich)
- Druckdifferenz
- Warmluft- bzw. Heizleistung
- Mikrowellenenergie bzw. Mikrowellenleistung
- Leistungsbedarf zur Prozessluftförderung
- Einschaltdauer Rührwerk

Die Feuchtegehaltsbestimmung des eingesetzten Körnermais sind mit einem geeichten Getreidefeuchtemessgerät (Pfeuffer HE 90) sowie einem thermogravimetrischen Messgerät (Ohaus MB 45) durchgeführt

worden. Referenzmessungen sind im Trockenschrank abgeglichen worden. Für die durchgeführten Trocknungsversuche ist erntefrischer Körnermais verwendet worden. Im Rahmen dieser Ausarbeitung werden drei Versuche am Chargenmischer-trockner beschrieben, wobei der erste Versuch aus zwei Teilversuchen besteht:

Versuch 1: Ermittlung des Eindringverhaltens in eine Körnermaisschüttung nur mit Mikrowelle

- 1a: ohne Durchmischen mit dem Rührwerk
- 1b: mit anschließendem Durchmischen mit dem Rührwerk

Versuch 2: Ermittlung des Trocknungsverhaltens bei alleiniger Warmlufttrocknung

Versuch 3: Ermittlung des Trocknungsverhaltens bei kombinierter Warmluft-Mikrowellentrocknung

2.2.1 Versuchsmaterial

Für die Versuche ist Körnermais der Sorte Boss verwendet worden, der einen Tag vor der Versuchsdurchführung geerntet worden ist. Die Abreifebedingungen waren an dem Standort aufgrund einer sandigen Bodenbeschaffenheit nicht optimal. Im stehenden Bestand waren Anzeichen von Trockenstress erkennbar. Die Kolbengröße war teilweise heterogen, ebenso die Größe der Körner selbst. Der Erntefeuchtegehalt betrug 29 %.

2.2.2 Versuch 1: Ermittlung des Eindringverhaltens in eine Körnermaisschicht nur mit Mikrowelle

In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass ein freier Abstand der am Magnetron austretenden Mikrowellen bis zum Auftreffen auf die feuchte Körnermaisschichtoberfläche günstig ist, der der ein- bis dreifachen Wellenlänge der Mikrowellenfrequenz entspricht. Der Chargenmischer-trockner ist mit 25 kg Körnermais mit einem Feuchtegehalt von 29,0 % und einer Korntemperatur von ca. 11 °C befüllt worden. Um Feuchtigkeit abzuführen, ist die Schüttung mit Kaltluft (20,3 °C, 65,8 % rel. Luftfeuchtegehalt) bei einem Volumenstrom von 100 m³ h⁻¹ durchströmt worden. Hierdurch hat sich eine geringfügige Verzerrung des Temperaturausbreitungsprofils im Mais ergeben. Für die Dauer von 300 s wurden Mikrowellen mit einer Sendeleistung von 600 W appliziert. Hiernach ist der Deckel mit dem integrierten Magnetron für Infrarotaufnahmen (Abb. 5) entfernt worden. Im ersten Teil des Versuches (1a) ist der Körnermais nicht bewegt worden. Im zweiten Teil des Versuches (1b) wurde das Rührwerk zunächst für ½ Umdrehung, dann für ein, für zwei, für zehn und weiterhin für 20 Umdrehungen (2 Minuten) eingeschaltet und die Oberfläche der im Trockner befindlichen Körnermaisschüttung mit der Infrarotkamera (FLIR Thermo-CAM Typ PM 575) aufgenommen.

Durch die Abfolge an Fotografien wird die Wirkung der Durchmischung und Temperaturverteilung der Maiskörner sichtbar.

2.2.3 Versuch 2: Ermittlung des Trocknungsverhaltens bei alleiniger Warmlufttrocknung

Der Versuch 2 ist – ebenso wie Versuch 3 – mit je 25 kg Feuchtmals durchgeführt worden. Zunächst wurde mit:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{Frishmasse}} \cdot \frac{F_A - F_E}{100 - F_E} \quad (1)$$

$m_{\text{H}_2\text{O}}$	=	Masse Wasser	[kg]
$m_{\text{Frishmasse}}$	=	Masse Feuchtmals	[kg]
F_A	=	Anfangsfeuchtegehalt	[%]
F_E	=	Endfeuchtegehalt	[%]

die Masse Wasser ermittelt, die aus dem Körnermais entfernt werden muss, um das Zielgewicht für einen Endfeuchtegehalt von 14,0 % zu erreichen. Während des Trocknens sind keine Feuchtegehaltsmessungen am Produkt durchgeführt worden, stattdessen ist der Wasserentzug während des Trocknungsvorganges gravimetrisch mit Hilfe der Waage ermittelt worden. Für die ersten 45 Minuten ist eine Zulufttemperatur von 90 °C gewählt, anschließend ist die Zulufttemperatur bis zum Ende des Versuchs auf 130 °C erhöht worden. Der Trockner ist mit konstanter Prozessluftmenge von ca. 200 m³ h⁻¹ betrieben worden. Das Rührwerk ist permanent in Betrieb gewesen. Die Abluftzustände sind mit einem Klimamessgerät (Testo 400), bestehend aus einem Temperatur-Luftfeuchte-Kombinationsfühler mit angeschlossenem Datenlogger aufgezeichnet worden.

2.2.4 Versuch 3: Ermittlung des Trocknungsverhaltens bei kombinierter Warmluft-Mikrowellentrocknung

Für den Versuch 3 sind die aus Versuch 2 gewählten Zuluftbedingungen übernommen worden. Im Unterschied zu Versuch 2 ist nach Unterschreiten des Abluftfeuchtegehaltes von 75 % rel. Feuchte Mikrowellenenergie mit einer Sendeleistung von 360 W für 30 Minuten zugeschaltet worden. Das Rührwerk ist ebenfalls permanent in Betrieb gewesen.

3 Ergebnisse

3.1 Versuch 1

Abb. 3 zeigt den mit Mais gefüllten Chargenmischer-trockner von oben. Abb. 4 zeigt die Maisoberfläche aus Abb. 3 als Infrarotbild. Man erkennt eine nahezu gleichmäßige Temperaturverteilung der Oberfläche zwischen 5,6 und 13,6 °C. Helle Bereiche bedeuten hohe Temperaturen, dunkle Bereiche stehen für tiefe



Abb. 3: Ansicht in den Arbeitsraum des Chargenmischertrockners

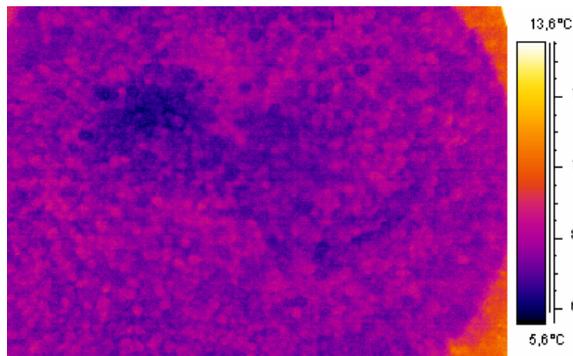


Abb. 4: Infrarotaufnahme mit erntefrischem Mais, Temperaturbereich: 5,6 – 13,6 °C

Temperaturen. Die Kamera wurde über dem Chargenmischertrockner fest montiert, die Aufnahmeposition ist während der Versuche nicht verändert worden.

Nach der Zufuhr von Mikrowellenenergie hat sich die Oberflächentemperatur unterschiedlich erhöht. Die Temperaturverteilung ist in Abb. 5a gezeigt. Sie lag zwischen 19,7 und 78,8 °C. In Abb. 5a erkennt man ausgeprägte heiße Stellen (hot spots) in relativ regelmäßigen Abständen voneinander, die sich durch das Wirkungsfeld der Mikrowellen im Trocknungsraum ergeben.

Wie sich die Erwärmung der Körnermaisschüttung durch Kornbewegung gleichmäßig verteilt, ist in einer Abfolge von Teilbildern (Abb. 5b – 5f) wiedergegeben. Mit ihnen soll gezeigt werden, wie sich die Temperaturverteilung an der Oberfläche, ausgehend vom erwärmten Zustand (Abb. 5a) ändert, sobald das Rührwerk für eine unterschiedliche Anzahl an Umdrehungen eingeschaltet wird. Ein Temperaturniveau in der gesamten Körnermaisschüttung wird dadurch gefördert. Man erkennt an der jeweils rechts stehenden Temperaturskala, dass die Temperaturspreizung sich erst nach zwei und mehr Umdrehungen verringert (Abb. 5d – 5f). Das Temperaturniveau in Teilbild 5f ist erwartungsgemäß tiefer als in Abb. 5a, weil ein Temperaturniveau zwischen den Körnern erfolgt

ist. Die Applikation der Maiskörner mit Mikrowellenenergie führte in Versuch 1 zunächst nur zu einer Kornerwärmung und noch keiner messbaren Trocknung. In Fortführung mit Versuch 3 stellten sich die unter 3.3 beschriebenen Zustände ein.

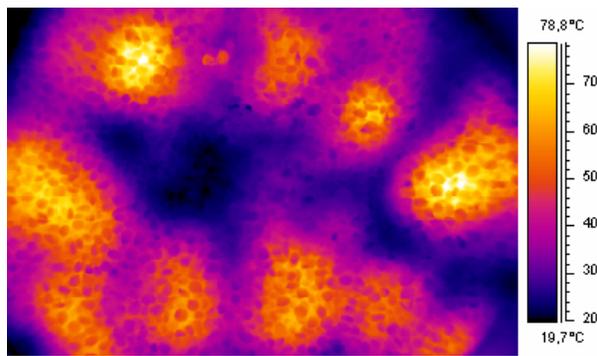
3.2 Versuch 2

In Abb. 6 sind die wesentlichen Ergebnisse des Versuches zur Körnermaistrocknung mit Warmluft grafisch dargestellt. Als Folge der Zulufttemperaturerhöhung nach 45 Minuten ist der Abluftfeuchtegehalt gesunken, wobei sich aber in Vorversuchen auch gezeigt hat, dass nach ca. einstündiger Trocknungsdauer mit vergleichbarem Eingangsfeuchtegehalt und weiterhin eingestellter Warmlufttemperatur von 95 °C der Abluftfeuchtegehalt aufgrund nachlassender Feuchtigkeitsabgabe des Körnermaises ebenfalls abfällt. Durch die Erhöhung der Zulufttemperaturen auf 130 °C hat sich mit einem Zeitverzug von 15 Minuten der Abluftfeuchtegehalt bei ca. 78 % stabilisiert. Bis zum Ende der Trocknung ist der Abluftfeuchtegehalt auf etwa 35 % gefallen. Die Ablufttemperatur hat von etwa 10 °C zu Versuchsbeginn auf 36,8 °C zum Ende des Versuches zugenommen.

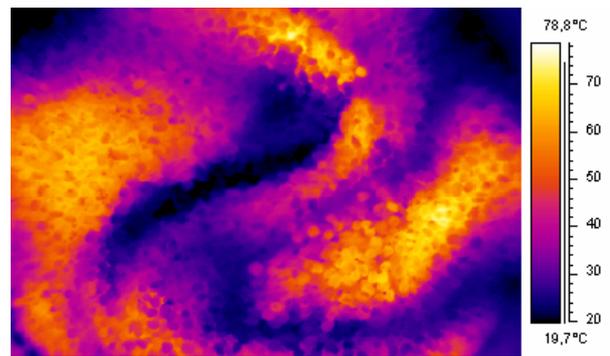
Die Korntemperatur konnte während der Trocknung nicht messen werden. Die größte Wasserbeladung der Abluft hat sich nach 90 Minuten Trocknungsdauer mit 20 g m⁻³ eingestellt, um danach bis zum Ende des Versuches auf ca. 14 g m⁻³ abzufallen. Der Wasserentzug hat sich im Verlauf der Trocknung deutlich verringert. Im Ergebnis sind 4300 g Wasser entzogen worden. Bei einem Anfangsgewicht der Körnermaissprobe von 25000 g (Feuchtegehalt 29 %) betrug das Endgewicht der Probe 20700 g (Feuchtegehalt 14,2 %). Die Trocknungsdauer betrug 210 Minuten. Bei einem thermischen Energieeinsatz von 8,38 kWh ergab sich hierdurch ein Trocknungsenergiebedarf von 1,94 kWh kg⁻¹ Wasserentzug.

3.3 Versuch 3

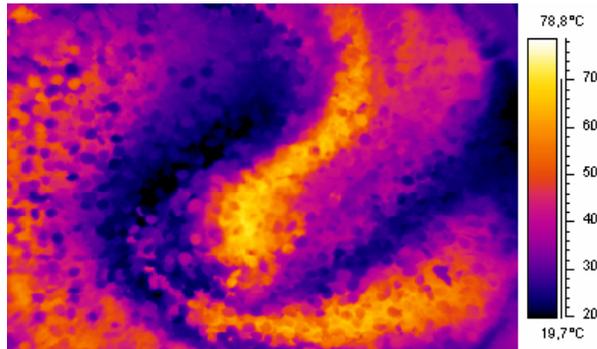
Im Unterschied zu Versuch 2 wurde ergänzend zur Warmlufttrocknung Mikrowellenenergie unterstützend eingesetzt (Abb. 7). Als Einschaltkriterium ist der Abluftfeuchtegehalt gewählt worden. Nach Unterschreiten von 75 % rel. Feuchte wurde die Mikrowellenapplikation mit 360 W Sendeleistung für 30 Minuten eingeschaltet. Dieses war nach der 82. Trocknungsminute gegeben. Aufgrund dieser Mikrowellenzufuhr hat sich eine Erhöhung des Abluftfeuchtegehaltes auf ca. 80 % eingestellt. Damit hat sich die Wasserbeladung der Abluft auf 28,1 g m⁻³ erhöht. Zum Ende der Trocknung ist der Abluftfeuchtegehalt auf 19,3 % abgefallen. Der erforderliche Wasserentzug von 4300 g ist bereits nach der 135. Trocknungsminute erreicht worden, die Ablufttemperatur erreichte zum



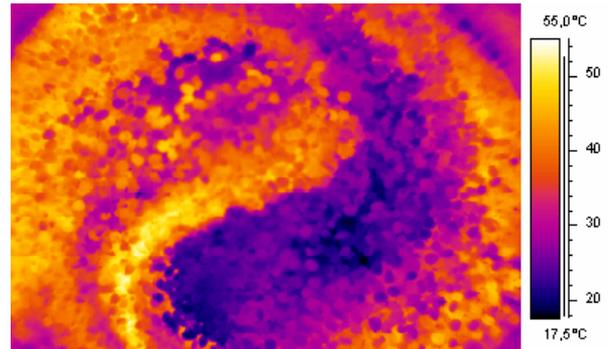
a) Durch Mikrowellenapplikation erwärmter Körnermais ohne Produktbewegung, Temperaturbereich: 19,7 – 78,8 °C



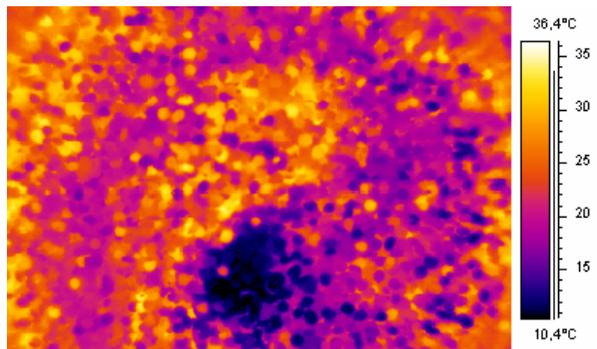
b) Mikrowellenapplikation nach ½ Umdrehung, Temperaturbereich: 19,7 – 78,8 °C



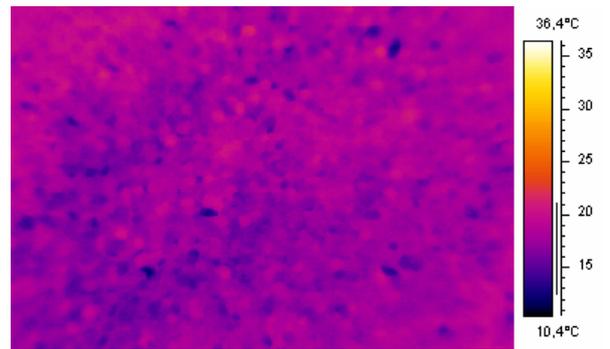
c) Mikrowellenapplikation nach 1 Umdrehung, Temperaturbereich: 19,7 – 78,8 °C



d) Mikrowellenapplikation nach 2 Umdrehungen, Temperaturbereich: 17,5 – 55,0 °C



e) Mikrowellenapplikation nach 10 Umdrehungen, Temperaturbereich: 10,4 – 36,4 °C



f) Mikrowellenapplikation nach 20 Umdrehungen, Temperaturbereich: 10,4 – 36,4 °C

Abb. 5, Teilbilder a – f: Abfolge von Infrarotaufnahmen der durch Mikrowellenenergie erwärmten Körnermaisschüttung bei zunehmender Produktdurchmischung. Angegeben sind jeweils die Anzahl der Rührwerksumdrehungen und die Bandbreite der Oberflächentemperatur.

(Teilbild 5a zu Versuch 1a; Teilbilder 5b – 5f zu Versuch 1b)

Ende der Trocknung 45,9 °C. Bei einem Energieeinsatz von 6,15 kWh für Warmluft und einem Energieeinsatz für den Mikrowelleneinsatz von 0,25 kWh ergab sich zum Trocknen eine eingesetzte Energie von 6,40 kWh. Der spezifische Trocknungsenergiebedarf betrug somit 1,48 kWh kg⁻¹ Wasserentzug.

4 Diskussion

Abb. 5 verdeutlicht eine typische Mikrowelleneigenschaft. Die Mikrowellen verteilen sich im Arbeitsraum nicht gleichmäßig. Dieses führt zu unterschiedlichen Absorptionen und damit zu ungleichen Erwärmungen,

die sich in unterschiedlichen Temperaturen (hot spots) zeigen. Die Abstände zwischen heißen und kalten Stellen zeigen, dass sich eine stehende Welle ausgebildet hat, die durch die Geometrie des Trocknerinnenraumes, durch das Trocknungsgut und die Befüllhöhe beeinflusst worden ist. Hierdurch hervorgerufene Temperaturdifferenzen sind für Trocknungsvorgänge unerwünscht. Abhilfe ist mechanisch durch Umrühren der Schüttung (Teilbilder 5b – 5f) möglich. Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz eines Feldrührers (Decreau 1986, Fanslow & Saul 1971), um das Mikrowellenfeld im Arbeitsraum zu gleichmäßigem. Aus

Versuch 1 zeigt sich, dass der hohe Feuchtigkeitsgehalt von Körnermais eine begrenzte Eindringtiefe der Mikrowellen bei guter Energieumsetzung ergibt. Hierzu sei auch auf Böckelmann et al. (2007) verwiesen. Zur Abfuhr der freigesetzten Feuchte ist nicht angewärmte Prozessluft eingesetzt worden, wobei aber durch die Strömungsrichtung bedingt Wärmeenergie in tiefere Kornschichten verschoben wurde. Hierdurch wurde das Temperaturprofil der Maisschüttung beeinflusst. Für gleichmäßige Korntemperaturen ist daher ein permanentes Durchmischen erforderlich. In Vorversuchen hat sich anhand der Zugabe von verfärbtem Körnermais gezeigt, dass bei der vorstehenden Versuchsanlage und auf Dauerbetrieb geschaltetem Rührwerk eine vollständige Durchmischung nach ca. 360 Sekunden (60 Rührwerksumdrehungen) gegeben war.

Der stündliche Wasserentzug ist bei der Körnermaistrocknung abnehmend (Mühlbauer 1972, Toftdahl 1987). Über den gesamten Trocknungsverlauf gesehen weisen praxistypische Warmlufttrockner bei der Maistrocknung von 35 % auf 15 % einen mittleren Feuchteentzug von ca. 4 % h⁻¹ auf. Hierzu ist ein Verhältnis von Inhalt im Trockenraum zu Durchsatz pro Stunde von 3,5:1 bis 4,5:1 erforderlich. Je niedriger der Anfangsfeuchtegehalt ist, desto geringer ist der durchschnittliche stündliche Feuchteentzug (Kröll & Kast 1989). Der Wasserentzug aus Versuch 2 erforderte 210 Trocknungsminuten von einem Anfangsfeuchtegehalt 29 % auf einen Endfeuchtegehalt von 14,2 %. Das entspricht einem mittleren Feuchteentzug von 4,22 % h⁻¹. Unter Berücksichtigung des Anfangsfeuchtegehaltes von 29 % zeigt sich, dass die Bemessung des Chargenmischertrockners hinsichtlich möglicher Trocknungszeiten mit praxisbekannten Warmlufttrocknern korreliert.

Bei Versuch 2 beträgt der Trocknungsenergieeinsatz 1,94 kWh je kg Wasserentzug. Dieser Energiebedarf

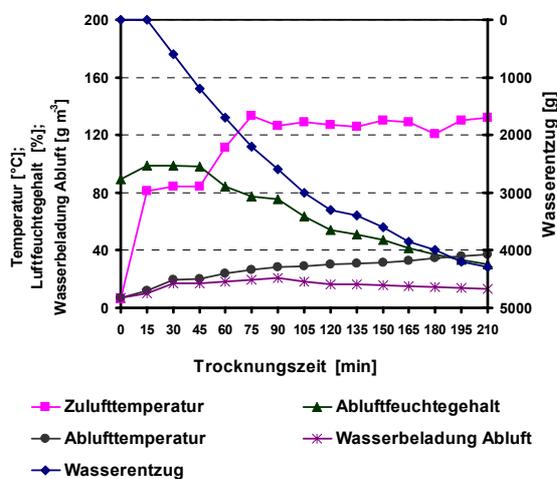


Abb. 6: Trocknungsverlauf der Warmlufttrocknung im Chargenmischertrockner

ist im Vergleich zu Warmlufttrocknern aus der Praxis hoch, wobei das Versuchsziel eine kurze Trocknungszeit zu erreichen sich auch nur dann realisieren lässt, wenn über die gesamte Trocknungsdauer ein ausreichend hohes Dampfdruckgefälle zwischen den Körnern und der Prozessluft besteht. Die Abluftsättigung ist mit fortschreitender Trocknung nachlassend. Das ist typisch für chargenweises Trocknen. In die Energiebetrachtungen fließt auch die Erwärmung des Trockners ein. Bezogen auf die Masse Feuchtmais von 25,00 kg ist die Eigenmasse mit 77,20 kg hoch. In der Praxis weisen aus Stahl, Edelstahl oder Aluminium gebaute Körnermaistrockner mit einem Fassungsvermögen von beispielsweise 40000 kg Körnermais eine Eigenmasse von ca. 10000 bis 18000 kg auf. Bei dem Versuchstrockner sind die Masseverhältnisse umgekehrt. Die Trocknermasse ist deshalb von praktischer Bedeutung, weil sich trotz der Wärmeisolierung des zylindrischen Behälters eine Energieaufnahme der wärmeaufnehmenden Bauteile einstellt (Gerecke 1990). Eine Betrachtung der reduzierbaren Wärmeverluste soll aber in dieser Ausarbeitung nicht vertieft werden, der Einfluss auf die Versuche 2 und 3 ist vergleichbar. Bedingt durch den Anfangsfeuchtegehalt von 29 % ist der Wärmeeintrag in die Maiskörner durch eine schlechtere Wärmeleitung langsamer, als bei einem Anfangsfeuchtegehalt von 35 %. Hierdurch wird ein Grund für den hohen spezifischen Energiebedarf bei dieser Versuchsdurchführung gesehen. Durch weitere Versuchsreihen während der Erntezeiträume im Herbst 2003 bis 2006 mit diesem Trockner hat sich aber gezeigt, dass mit reiner Warmlufttrocknung und Eingangsfeuchten von 35 % ein spezifischer Energiebedarf von 1,15 kWh kg⁻¹ Feuchteentzug ausreicht, allerdings ist dann etwa die doppelte Trocknungszeit erforderlich. Bei der Warmlufttrocknung besteht zwischen minimalem Energieeinsatz und maximalem Durchsatz ein Zielkonflikt.

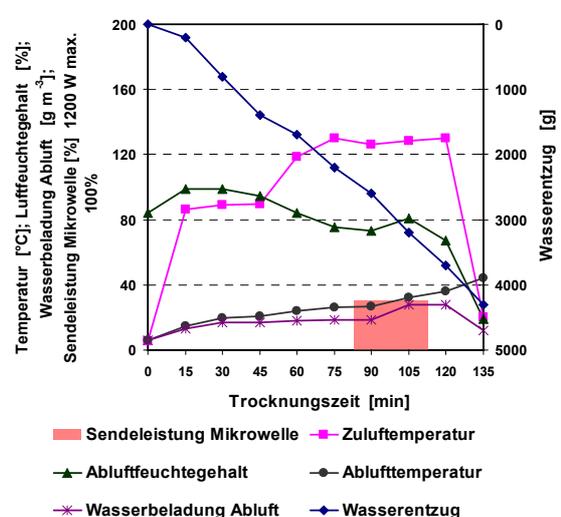


Abb. 7: Trocknungsverlauf bei mikrowellenunterstützter Warmlufttrocknung im Chargenmischertrockner

Der Entzug von 29 auf 14 % Feuchtegehalt erfordert bei mikrowellenunterstützter Warmlufttrocknung (Versuch 3) bei gleich eingestellten Prozessluftbedingungen eine Trocknungsdauer von 135 Minuten, wobei auch der Energiebedarf auf $1,48 \text{ kWh kg}^{-1}$ Feuchteentzug deutlich abfällt. Im Vergleich von Abb. 6 zu Abb. 7 zeigt sich, dass bis zur 75. Trocknungsminute die Kurvenverläufe vergleichbar sind. In Versuch 2 war aber das Niveau der Wasserbeladung deutlich geringer als in Versuch 3. Infolge dessen wurde der Wasserentzug von 4300 g deutlich früher erreicht. Hierdurch begründet sich die kürzere Trocknungsdauer. Eine kurze Trocknungszeit stellt einen großen trocknungstechnischen Vorteil dar, wobei durch die Mikrowellenapplikation nur soviel Wärmeenergie im Korninneren wirksam wird, wie es für einen bestimmten Feuchteentzug erforderlich ist. Die Mikrowellenenergie ist in Versuch 3 nach thermodynamischen Überlegungen für 30 Minuten zugeschaltet worden mit dem Ziel, die Trocknungsgeschwindigkeit zu erhalten und gegebenenfalls zu erhöhen. Der Energieanteil der Mikrowellenerwärmung betrug bei diesem Versuch 3,9 %. Der Versuch 3 zeigt im Vergleich zum Versuch 2 einen signifikanten Anstieg der Ablufttemperatur zum Trocknungsende. Im Ergebnis ist bei dem mikrowellenunterstützten Versuch zuviel Energie an das Trocknungsgut herangeführt worden.

Vorversuche haben gezeigt, dass das Korn bei der gleichzeitigen Trocknung mit Warmluft und Mikrowellen eine höhere Temperatur annimmt, als bei gleicher Trocknungszeit und reiner Warmlufttrocknung mit gleicher Warmlufttemperatur. Bei optimierter mikrowellenunterstützter Prozessführung ist zu erwarten, dass es möglich ist, die Korntemperatur zum Trocknungsende niedriger zu halten als bei der Warmlufttrocknung. Dieses begründet sich damit, dass die Mikrowelle im Korninneren in Wärme umgewandelt wird und dort einen Dampfdruck erzeugt. Dadurch wird die Feuchtigkeit nach außen transportiert, wobei die Poren feucht bleiben. Warmlufttrockner können diesen Effekt prinzipbedingt nicht vollständig nutzen. Die Warmlufttrocknung bewirkt hingegen eine Trocknung zunächst an der Oberfläche, womit die Diffusion der Feuchtigkeit aus dem Korninneren erschwert wird. Durch Wärmeleitung wird die Wärme ins Korninnere transportiert, dort erhöht sich dann der Dampfdruck. Die Feuchtigkeit bewegt sich gegen stärker geschlossene Porenöffnungen. Um die Feuchtigkeit aus dem Korn abzuführen wird demzufolge eine höhere Temperatur benötigt. Es ist noch darzulegen, ob und inwieweit ein gezieltes oder über den Trocknungsverlauf getaktetes Aktivieren der Mikrowellen mit einer angepassten Sendeleistung den Trocknungsvorgang weiter beschleunigt, um dabei auch den Gesamtenergieeinsatz zu optimieren (Kialbekov et al. 2006, Radajewski et al. 1988, Shivhare et al. 1994).

5 Schlussfolgerungen

Die Versuche zielen darauf ab, die technische Machbarkeit einer Verfahrenskombination zur Trocknung von Körnermais mit Warmluft und Mikrowellen zu erarbeiten. Wesentliche Ziele sind dabei, Zusammenhänge zwischen Trocknungszeit und spezifischem Energiebedarf aufzuzeigen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass durch eine angepasste dielektrische Trocknung der Anteil konvektiver Energie reduziert werden kann. Im Vergleich zur reinen Warmlufttrocknung führt bei einem Parallelversuch die Verfahrenskombination mit einer mikrowellenunterstützten Warmlufttrocknung zu einer Verkürzung der Trocknungszeit um 35 % und zu einer Reduzierung des Gesamtenergieeinsatzes um 22,6 %. Damit die Mikrowellenenergie gleichmäßig im Produkt wirkt, ist eine ausreichende Produktbewegung während der Trocknung erforderlich. Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn die Wirkrichtung der Mikrowellenenergie mit dem Warmluftstrom gleichgerichtet ist. Durch eine richtige Auslegung der Trocknerkonstruktion, der Energiekreisläufe bestehend aus Wärmezufuhr zum Trocknungsgut, Abwärmennutzung der/des Magnetron(s) und Abwärmennutzung des erwärmten trockenen Gutes lassen sich Trocknungsreserven mobilisieren. Für eine optimale Anlagenkonfiguration ist es daher richtig, unterschiedliche Vorgänge während der Konservierung mit dem Oberbegriff Trocknen zu trennen. Hierbei ist die konstruktive Gestaltung der Mikrowelleneinkopplung in das Trocknungssystem wichtig. Bei guter Prozessführung wird auch der Trocknungsprozess seinerseits durch Optimierungen innerhalb der einzelnen Trocknungsabschnitte einschließlich der Rückkühlung und Wärmerückgewinnung verfahrenstechnisch unterschiedlich gestaltet sein müssen. Hier kann die ergänzende Mikrowellenapplikation die Konvektionstrocknung unterstützen. Bei der Weiterentwicklung zu praxisreifen Systemen wird der Einsatz zunehmend knapper und teurer werdender Energie an Trocknungsanlagen neu zu bewerten sein.

Literaturverzeichnis

- Askeland D.R. (1996): Materialwissenschaften, Grundlagen, Übungen, Lösungen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 607 pp.
- Beke J. (1997): Terményszárítás. Verlag Agroinform Ungarn, Budapest, p. 228-232.
- Böckelmann M., Weimar R.-J., Lücke W., Hörsten von D. (2007): Der Einsatz von Mikrowellen zur Maistrocknung – Grundlagen und Laborversuche. Agrartechnische Forschung 13 (2), 27-36.
- Ciesler B. (1986): Untersuchungen zum Trocknungsverlauf und zur Entwicklung eines Trocknungsmodells der Getreidesatz-trocknung. VDI-MEG 118, Göttingen, Dissertation, 102 pp.
- Decareau R.V. (1986): Microwave Processing and Engineering. Ellis Horwood Ltd., Chichester, 224 pp.

- Fanslow G.E., Saul R.A. (1971): Drying Field Corn with Microwave Power and Unheated Air. *Journal of Microwave Power* 6 (3), 229-235.
- Gerecke K.H. (1990): *Vademekum – Technische Werte der Getreideverarbeitung und Futtermitteltechnik*. Band 1, Verlag Moritz Schäfer, 158 pp.
- Gröber H., Erk S., Grigull U. (1963): *Die Grundgesetze der Wärmeübertragung*. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 436 pp.
- Heindl A. (1993): *Mikrowellenunterstützte Vakuumkonvektionstrocknung*. Technische Universität München, Dissertation, Dissertation, 180 pp.
- Hippel von A.R. (1954): *Dielectric Material and Applications*. MIT Press, New York, 438 pp.
- Kialbekov R., Hörsten von D., Lücke W., Hahn J., Frerichs L. (2006): Trocknungsverhalten und Qualitätsentwicklung von Halmgut bei Konvektionstrocknung mit Mikrowellen- und Hochfrequenzvorbehandlung. *Agrartechnische Forschung* 12 (1), 8-13.
- Krischer O., Kast W. (1978): *Trocknungstechnik, die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, Band 1. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 287 pp.
- Kröll K., Kast W. (1989): *Trocknungstechnik*, Band 3. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 632 pp.
- Lücke W. (1992): *Mikrowellenbehandlung pflanzlicher Produkte*. Habilitation, Georg-August Universität Göttingen, 96 pp.
- Lücke W. (2006): *Microwave Drying of Agricultural Materials - Basics, Effects and Mathematical Simulation*. CIGR World Congress, Agricultural Engineering for a Better World, Germany, 617 pp.
- Maltry W., Pötke E., Schneider B. (1975): *Landwirtschaftliche Trocknungstechnik*. VEB Verlag Technik Berlin, 524 pp.
- Martinez R. (2001): *Modelling and Simulation of the Two-Stage Rice Drying System in the Philippines*. Stuttgart-Hohenheim, Dissertation, 165 pp.
- Matthis H.J. (1956): *Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter*. VDI Forschungsbericht 454.
- Mellmann J., Richter I., Maltry W. (2005): *Optimierte Steuerung von Getreideschachttrocknern*. Bornimer Agrartechnische Berichte 52, 55 pp.
- Metaxas A.C., Meredith R.J. (1983): *Industrial Microwave Heating*. Peter Peregrinus Ltd, London, UK, 27 pp.
- Mühlbauer W. (1972): *Untersuchung über die Trocknung von Körnermais unter besonderer Berücksichtigung des Gleichstromtrocknungsverfahrens*. Dissertation, Stuttgart-Hohenheim, 67 pp.
- Münzing K. (1995): *Studien zur Weizentrocknung unter besonderer Berücksichtigung wichtiger Einflussvariablen für die Praxis*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 87 pp.
- Püschner H. (1964): *Wärme durch Mikrowellen - Grundlagen, Bauelemente und Schaltungstechnik*. Philips technische Bibliothek, Eindhoven NL, 80 pp.
- Radajewski W., Jolly P., Abawi, G.Y. (1988): Grain Drying in a Continuous Flow Drier Supplemented with a Microwave Heating System. *Journal of Agricultural Engineering Research* 41, 211-225.
- Shivhare U.S., Raghavan G.S.V., Bosisio R.G. (1994): *Modelling the Drying Kinetics of Maize in a Microwave Environment*. *Journal of Agricultural Engineering Research* 57, 199-205.
- Skriegan E. (2005): *Technologie der Lagerung und Nacherntebehandlung von Körnerfrüchten*. Verlag Moritz Schäfer, Detmold, 184 pp.
- Tarsa A. (1991): *Versuche zur Mikrowellentrocknung von Möhren und der Rekonstitution der Trockenprodukte*. Diplomarbeit, Georg-August Universität Göttingen, 53 pp.
- Toftdahl O. (1987): *Grain Drying*. Innovation Development Engineering ApS, Denmark, 19 pp.
- Zscheischler J., Estler M.C., Staudacher W., Groß F., Burgstaller G., Streyl H., Rechmann T., (1990): *Handbuch Mais – Umweltgerechter Anbau – Wirtschaftliche Verwertung*. DLG Verlag Frankfurt am Main, 320 pp.