

Feuchtemessung in Weizen mit der Mikrowellen-Resonanzmethode

Von Dr.-Ing. Udo Schlemm, Hendrik Richter, Hamburg, und Dipl.-Ing. László Kocsis, Dr.-Ing. Jochen Mellmann, Potsdam-Bornim

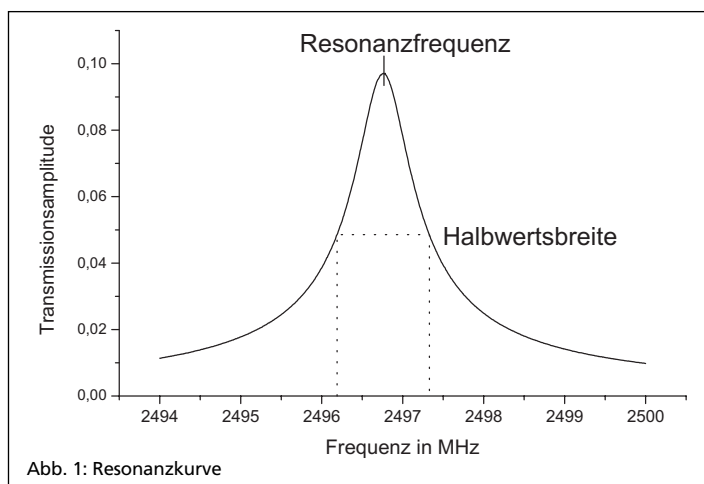
Einleitung

Für Betreiber kontinuierlicher Getreidetrockner stellen die Gutfeuchteschwankungen des feuchten, erntefrischen Getreides vor der Trocknung nach wie vor ein erhebliches regelungstechnisches Problem dar. Die verwendeten Steuerungssysteme sind häufig nicht in der Lage, diese Feuchteschwankungen während der Trocknung sicher auszugleichen und dabei gleichzeitig das Gut auf einheitliche Zielfeuchte zu trocknen. Unter- bzw. Über-trocknung sind häufig die Folgen, verbunden mit Qualitäts-einbußen und wirtschaftlichen Verlusten. Trocknerhersteller verwenden zur Prozesssteuerung zunehmend Sensoren für die direkte Online-Messung der Gutfeuchte. Bisher auf dem Markt verfügbare Sensoren sind für eine dichteunabhängige Messung der Gutfeuchte im höheren Feuchtebereich nicht geeignet oder nicht flexibel an mehreren Messstellen einsetzbar.

Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes des Leibniz-Institutes für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) mit der Firma Tews Elektronik, Hamburg, erfolgten Versuche zur Online-Feuchtemessung in Getreide. Ziel war die Entwicklung von Feuchtesensoren für verschiedene Messpositionen in Getreidetrocknern, wie z. B. am Guteintrag und -austrag. Die Feuchtesignale sollen zur Steuerung von Getreidetrocknern geeignet sein. Als Messmethode wurde hierbei die Mikrowellen-Resonanzmethode gewählt, auf die die Firma Tews Elektronik spezialisiert ist [1]. Nach der Entwicklung geeigneter Sensoren erfolgte zunächst eine Kalibrierung der Messung der Feuchte von Weizen. Die Kalibrierung wurde mit Weizenproben im Feuchtebereich von 7% w. b. bis 29% w. b. (w. b. = wet basis, bezogen auf feuchtes Gut) durchgeführt. Die Referenzfeuchten wurden durch Ofentrocknung nach DIN 10350 bzw. ISO 712 bestimmt [2]. Die Mikrowellensensoren wurden an einem Getreidetrockner getestet, wobei durch Online-Messung der Gutfeuchten am Eintrag und am Austrag die Trocknung des Weizens messtechnisch verfolgt werden konnte [3].

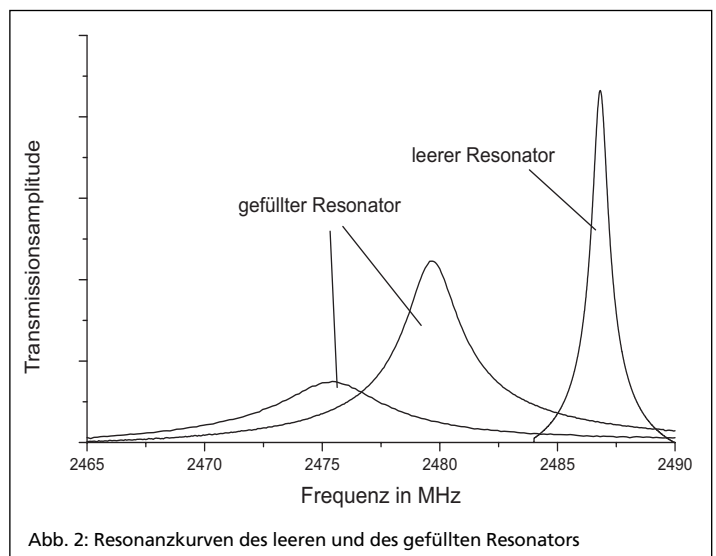
Messprinzip

Durch die Mikrowellen-Resonanzmethode ist einerseits eine Feuchtemessung möglich, die unabhängig von der Dichte bzw. der Masse des Messgutes ist. Andererseits kann eine Dichte- oder Massebestimmung unabhängig von der Feuchte des Messgutes durchgeführt werden. Im Folgenden werden die Grundlagen dieser Messtechnik beschrieben, siehe hierzu auch [4, 5].



Ein Mikrowellenresonator hat verschiedene Resonanzfrequenzen, d. h. unterschiedliche Frequenzen, bei denen Maxima der Mikrowellentransmission vorliegen. Diese Resonanzfrequenzen hängen von den spezifischen Abmessungen des Resonators ab. Bei einer Messung nach dem hier vorgestellten Prinzip wird jeweils nur ein Resonanzmode verwendet. Eine Resonanzkurve wird durch zwei Parameter charakterisiert (Abb. 1): die Resonanzfrequenz und die Halbwertsbreite der Resonanzkurve.

Wird der Resonator mit dem Messgut gefüllt, verändern sich die beiden Kenngrößen der Resonanzkurve, wie Abb. 2 veranschaulicht. Bedingt durch eine Wellenlängenverkürzung im Messgut sinkt die Resonanzfrequenz. Gleichzeitig wird die Resonanzkurve durch dielektrische Verluste, die im Messgut auftreten, verbreitert.



Bei den Messungen werden die Änderungen der Resonanzparameter detektiert. Somit sind die beiden Messwerte erstens die Verschiebung der Resonanzfrequenz und zweitens die Vergrößerung der Halbwertsbreite der Resonanzkurve. Da zwei voneinander unabhängige Parameter gemessen werden, können zwei Materialeigenschaften bestimmt werden. Dies sind zumeist die Materialfeuchte und die Dichte bzw. die Masse. Da die gemessenen Parameter die Veränderungen der Resonanzkurve beschreiben, müssen die Resonanzfrequenz und die Breite der Resonanzkurve des leeren Resonators ebenfalls bestimmt werden. Die Durchführung dieser tarierenden Leerresonanzmessung muss jedoch nicht vor jeder Messung erfolgen, sondern die Leerresonanzwerte werden in der Mikrowellenelektronik gespeichert.

Auswertalgorithmus für die Feuchtemessung

Im Folgenden wird die Auswertung der Mikrowellenmessungen beschrieben:

1. Der erste gemessene Parameter ist die Resonanzfrequenzverschiebung A in Hz:

$$A = f_0 - f_m \quad (1)$$

mit: f_0 : Resonanzfrequenz des leeren Resonators in Hz

f_m : Resonanzfrequenz des befüllten Resonators in Hz

2. Der zweite gemessene Parameter ist die Vergrößerung der Halbwertsbreite in Hz:

$$B = w_m - w_0 \quad (2)$$

mit: w_0 : Halbwertsbreite des leeren Resonators in Hz

w_m : Halbwertsbreite des befüllten Resonators in Hz

3. Berechnung des dichteunabhängigen Mikrowellen-Feuchtewertes Φ :

$$\Phi = \arctan(B/A) \quad (3)$$

Die beiden Parameter A und B sind in gleicher Weise abhängig von der Masse bzw. der Dichte des Messgutes. Aus diesem Grund ist der Quotient B/A unabhängig von Masse bzw. Dichte und hängt nur noch von der Feuchte des Messgutes ab. Der Arcustangens dieses Quotienten wird gebildet, damit der dichteunabhängige, dimensionslose Mikrowellen-Feuchtewert Φ einen Wert zwischen 0 und 1 einnimmt und somit eine sehr anschauliche Feuchtemessgröße darstellt.

In den meisten Fällen kann die Beziehung zwischen Materialfeuchte und dem Mikrowellen-Feuchtewert Φ als linear angenommen werden. Für verschiedene Messgüter muss jedoch eine nichtlineare Beziehung verwendet werden. Im Falle der Feuchtemessungen in Weizen wurde eine polynomische Beziehung zweiter Ordnung angewendet gemäß Gleichung (4):

$$u = a_1 \cdot \Phi^2 + a_2 \cdot \Phi + a_3 \quad (4)$$

mit: u: Materialfeuchte in %

a_i : Kalibrationskoeffizienten

Φ : dimensionsloser Mikrowellen-Feuchtewert

Eine Feuchtekalkulation kann außerdem über die Verschiebung der Resonanzfrequenz A nach Gleichung (1) oder die Vergrößerung der Halbwertsbreite B nach Gleichung (2) erfolgen. Eine solche Feuchtemessung ist allerdings nicht unabhängig von der Masse bzw. der Dichte des jeweiligen Messgutes. Beziehung (5) zeigt eine Kalibrationsbeziehung zur Feuchtemessung über die Verschiebung der Resonanzfrequenz A:

$$u = b_1 \cdot A + b_2 \quad (5)$$

mit: u: Materialfeuchte in %

b_i : Kalibrationskoeffizienten

A: Verschiebung der Resonanzfrequenz in MHz

Kalibrationsmessungen

Für die Kalibrationsmessungen wurde ein planarer Sensor des Typs Tews P145/180 verwendet [6], der in einem Frequenzbereich von 2–3 GHz arbeitet. Als Versuchsgut dienten Proben von naturfeuchtem Weizen, die zwei Getreidechargen unterschiedlicher Feuchte von ca. 15% w. b. bzw. 18% w. b. entnommen wurden. Durch Trocknung und Befuchtung einzelner Proben ist der Feuchtebereich auf 7% w. b. bis 29% w. b. erweitert worden. Die Kalibration wurde durch wiederholte Messungen am ruhenden Produkt durchgeführt. Es wurden jeweils die Verschiebung der Resonanzfrequenz A und der Mikrowellen-Feuchtewert Φ gemessen. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Mittelwerte der gemessenen Mikrowellen-Feuchtewerte Φ und der Verschiebungen der Resonanzfrequenz A aller Messungen in Abhängigkeit von der Feuchte des Messgutes.

Abb. 3 zeigt die Mittelwerte der Mikrowellen-Feuchtewerte Φ in Abhängigkeit von der Feuchte des Messgutes. Da diese Werte ein Maximum bei einer Feuchte von etwa 21% w. b. aufweisen, ist eine Feuchtemessung über den Mikrowellen-Feuchtewert Φ nur bis zu einer Feuchte von ca. 19% w. b. möglich. Das Maximum resultiert aus den dielektrischen Eigenschaften des feuchten Weizens, ist also durch Materialeigenschaften des Messgutes bedingt. Nach einem Durchlauf des Getreides durch den Trockner wird der Feuchtegehalt des Messgutes einen Wert von 19% w. b. nicht übersteigen. Am Austrag des Trockners ist deshalb die dichte- bzw. masseunabhängige Feuchtemessung über den Mikrowellen-Feuchtewert Φ einsetzbar. Höhere Feuchtegehalte

treten dagegen am Guteintrag des Trockners auf. Hier ist eine alleinige Feuchtemessung über den Mikrowellen-Feuchtewert Φ nicht möglich.

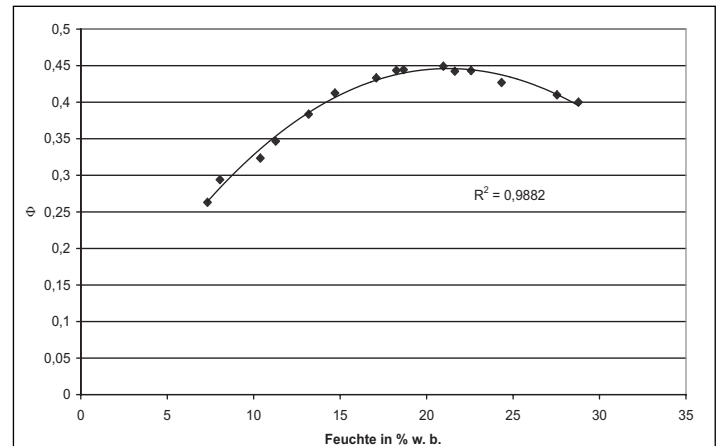


Abb. 3: Kalibrationsmessungen: Mikrowellen-Feuchtewert Φ in Abhängigkeit von der Feuchte, Regression

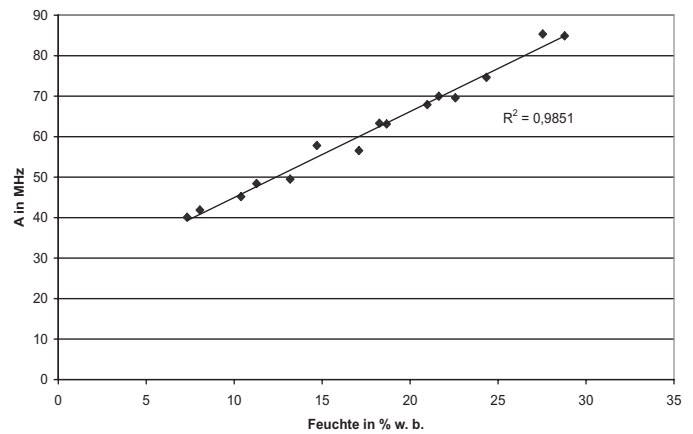


Abb. 4: Kalibrationsmessungen: Verschiebung der Resonanzfrequenz A in Abhängigkeit von der Feuchte, Regression

In Abb. 4 sind die Mittelwerte der Verschiebungen der Resonanzfrequenz A in Abhängigkeit von der Feuchte des Messgutes dargestellt. Eine Feuchtemessung über die Verschiebungen der Resonanzfrequenz A ist im gesamten betrachteten Feuchtebereich von 7% w. b. bis 29% w. b. möglich. Diese Feuchtemessung ist allerdings masse- bzw. dichteabhängig.

Für die Messung am Eintrag eines Getreidetrockners sind die beiden Möglichkeiten der Feuchtemessung kombinierbar: Für

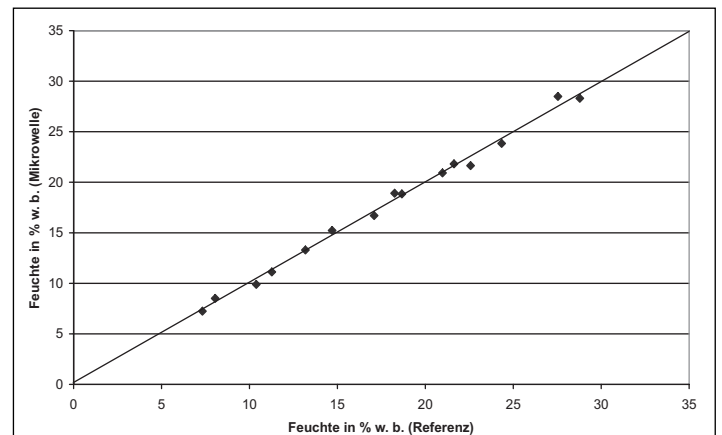


Abb. 5: Kalibrationsmessungen: Ergebnis der Feuchtemessung, sd = 0,51% w. b.

Verschiebungen der Resonanzfrequenz A bis zu 60 MHz (entspricht ca. 18% w. b. Feuchte, siehe Abb. 3 und 4) kommt Beziehung (4) zur Anwendung, für Verschiebungen der Resonanzfrequenz A über 60 MHz hinaus Beziehung (5). Die Abb. 5 zeigt das Ergebnis dieser Kombination. Die Standardabweichung s_d zwischen den Feuchte-Referenzwerten und den durch Mikrowellenmessung bestimmten Feuchtwerten beträgt $s_d = 0,51\%$ w. b. für den gesamten Feuchtebereich (7–29% w. b.). Die Standardabweichung s_d für die dichteunabhängige Feuchtemessung – Beziehung (4) – bis zu einem Feuchtegehalt von 18% w. b. beträgt $s_d = 0,39\%$ w. b., für die dichteabhängige Feuchtemessung – Beziehung (5) – oberhalb von 17% w. b. Feuchte $s_d = 0,63\%$ w. b. Diese Ergebnisse wurden trotz Variation der Getreidedichte auf dem Sensor erreicht.

Sensortest an einem Getreidetrockner

Nach der Kalibration erfolgte ein Praxistest der Feuchtemessung an einem Dächerschachttrockner im Technikumsmaßstab (Abb. 6) bei der Trocknung von Weizen. Diese Versuchsanlage wurde mit Fördermitteln des BMBF im Rahmen des Forschungsprojektes „Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern“ (FKZ: 0339992) errichtet, siehe auch [7]. Es wurde ein etwa neun-stündiger Dauerbetrieb des Trockners messtechnisch begleitet, wobei das in den Trockner eingebrachte Material aus zwei verschiedenen Getreidechargen stammte, die unterschiedliche Feuchten von ca. 15% w. b. bzw. 18% w. b. aufwiesen. Die Materialfeuchte wurde mit Mikrowellenresonatoren am Trocknereintrag und -austrag gemessen und stichprobenartig durch Ofentrocknung überprüft. Am Trocknereintrag lagen die gemessenen Feuchten zwischen etwa 10% w. b. und 18% w. b., am Trockneraustrag bei 10% w. b. bis 16% w. b. Die niedrigen Feuchtwerte sind auf den Anfahrprozess des Trockners mit bereits getrocknetem Getreide und das Nachfüllen von trockenem Getreide gegen Ende des Versuches zurückzuführen.



Abb. 6: Dächerschachttrockner im Technikum Potsdam-Bornim

Es konnten sehr gute Eigenschaften der Mikrowellenmessung im Praxiseinsatz am Getreidetrockner gezeigt werden. In Abb. 7 sind die Messergebnisse am Trockneraustrag als Vergleich der Referenzmessungen zu den Mikrowellenmessungen dargestellt, Abb. 8 zeigt die entsprechenden Ergebnisse am Trocknereintrag.

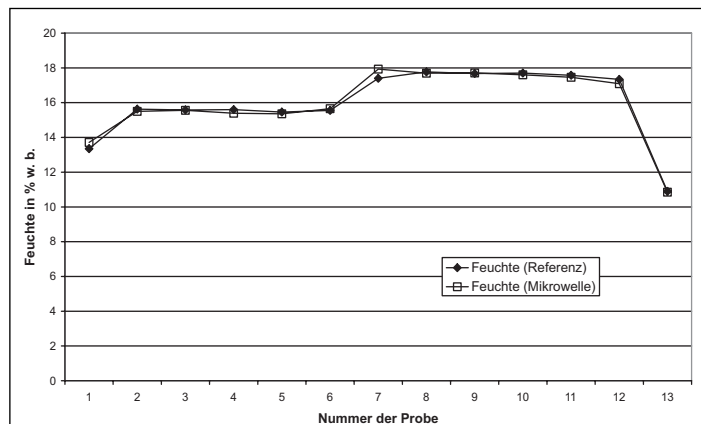


Abb. 7: Messungen am Trockneraustrag, $s_d = 0,22\%$ w. b.

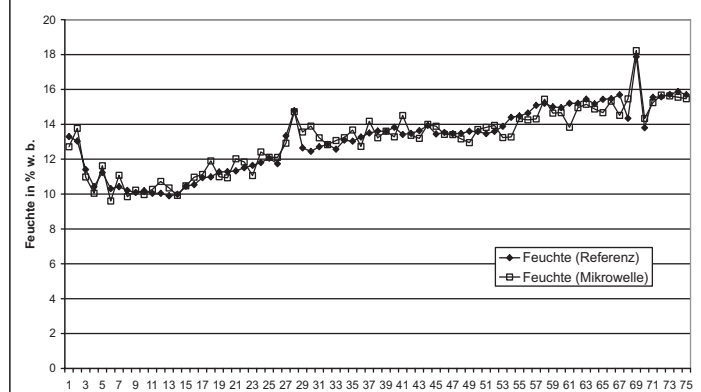


Abb. 8: Messungen am Trocknereintrag, $s_d = 0,55\%$ w. b.

Bei den Versuchen wurde eine starke Inhomogenität der Getreidefeuchte über den Querschnitt des Auslasses des Trockners festgestellt. Da das durch den Mikrowellenresonator erfasste Messgut im Allgemeinen nicht dasselbe war wie das, welches für die Referenzmessung verwendet wurde (u. a. bedingt durch die Probenahme), ergab sich eine größere Abweichung zwischen Mikrowellenmessungen und Referenzmessungen am Trockneraustrag als am Trocknereintrag. Die Standardabweichungen betragen am Trocknereintrag 0,22% w. b. und am Trockneraustrag 0,55% w. b.

Zusammenfassung

Mit dem Ziel der Sensorentwicklung zur Feuchtemessung am Ein- und am Austrag eines Getreidetrockners erfolgten Testmessungen mit einem planaren Mikrowellensensor im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes des Leibniz-Institutes für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) und der Firma Tews Elektronik, Hamburg. Es wurden Kalibrationsmessungen an Weizenproben mit Feuchtigkeitsgehalten von 7% w. b. bis 29% w. b. durchgeführt (w. b. = wet basis, bezogen auf feuchtes Gut). Die Standardabweichung zwischen den Messwerten des Mikrowellensensors und denen der Referenzmethode betrug $s_d = 0,51\%$ w. b. über dem gesamten Feuchtebereich.

Nach der Kalibration wurde ein Praxistest der Feuchtemessung am Dächerschachttrockner des ATB im Technikumsmaßstab bei der Trocknung von Weizen durchgeführt. Hierzu wurden Mikrowellenresonatoren am Trocknereintrag und -austrag eingesetzt.

Es wurde ein etwa neunständiger Dauerbetrieb des Trockners messtechnisch begleitet. Es konnte gezeigt werden, dass die Mikrowellenmessung für den Praxiseinsatz an einem Getreidetrockner im Pilotmaßstab sehr gut geeignet ist. Damit ist eine dichteunabhängige Feuchtemessung am Trocknereintrag und -austrag mit hoher Messgenauigkeit möglich.

Danksagung

Die Zusammenarbeit des Leibniz-Institutes für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) mit der Firma Tews Elektronik erfolgt im Rahmen des BMBF-geförderten Verbundprojektes Pro-Senso.net2 (www.prosenso.net), Teilprojekt 1.3: „Spezifische Verfahrensführung bei der Getreidetrocknung zur Inhibition von Mykotoxinbildnern durch sensortechnische Erfassung von Produktinhomogenitäten“ (FKZ 0339992A) und Teilprojekt 4: „Sensor zur Online-Getreidefeuchtemessung“ (FKZ 0339992J). Für diese Förderung möchten sich die Autoren an dieser Stelle bedanken.

Literatur

1. EP 468023 B1: Process and device for determining the moisture content of the material of a test object using microwaves (1991). – Tews Elektronik, Hamburg
2. ISO 712: Cereals and cereal products – Determination of moisture content – Routine reference method. – Third edition, © ISO (1998)
3. Kocsis, L., U. Schlemm, H. Richter, J. Mellmann, and I. Farkas: Online Microwave Measurement of the Moisture Content of Wheat. – In: Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC 2008), Seoul, Korea, July 6.–11., 2008, p. 631–635
4. Herrmann, R., und J. Sikora: Mikrowellen-Feuchtemesstechnik mit Resonatoren und ihre Anwendungen. – In: K. Kupfer u. a.: Materialfeuchtemessung. Band 513, Expert Verlag (1997), Renningen
5. Hauschild, T.: Density and Moisture Measurements Using Microwave Resonators. – In: K. Kupfer (Ed.): Electromagnetic Aquametry, Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Springer Verlag (2005), Heidelberg
6. EP 908718 B1: Microwave stray field sensor for humidity / density measurements (1998). – Tews Elektronik, Hamburg

7. Mellmann, J., I.-G. Richter und W. Maltry: Experiments on Hot-Air Drying of Wheat in a Semi-Technical Mixed-Flow Dryer. – *Drying Technology* 25 (2007) 7 and 8, p. 1287–1295

Measurement of the moisture content of wheat using the microwave resonance technique

With the aim to develop a new sensor for the moisture content at the inlet and outlet of a grain dryer test measurements were carried out using a planar microwave sensor. The signals obtained should be suitable for online measurements of the moisture content and for dryer control. This work is part of a collaborative project between the Leibniz Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim (ATB) and the company Tews Elektronik Hamburg. Calibration measurements were conducted at samples of wheat with moisture contents between 7% w. b. and 29% w. b. (w. b. = wet basis). The standard deviation attained between the measuring values of the microwave sensor and those of the reference method amounted to $sd = 0.51\%$ w. b. over the whole range of grain moisture content. After calibration the sensor was proved in a field test at the drying of wheat. These measurements have been carried out at the mixed-flow dryer test station of ATB. The microwave resonators were employed both at the dryer inlet and outlet. Using this installation a continuous dryer operation of about nine hours was monitored. As could be demonstrated the microwave sensor developed is suited very well for the density-independent online measurement of the moisture content under practical conditions at a pilot scale grain dryer. A high precision of the measurements was achieved both at the dryer inlet and outlet.