

- [21] *Wenner, H.-L.*: Einsatz und Leistung größerer Acker-
schlepper, a) Schlepperleistung in Abhängigkeit von Be-
triebsgröße und Betriebstyp.
Landtechnik von morgen, Folge 22, S. 28/44,
Freising: Schlüterwerk (Hrsg.) 1983.
- [22] *Auernhammer, H.*: Einsatz und Leistung größerer Acker-
schlepper, b) Auslastungsgrad und Gerätezuordnung.
Landtechnik von morgen, Folge 22, S. 45/58,
Freising: Schlüterwerk (Hrsg.) 1983.
- [23] *Olfe, G. u. H. Schön*: Schlepperbesatz und Schlepperver-
wendung bei unterschiedlichen betrieblichen Verhältnissen.
Grundl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 2, S. 59/66.
- [24] *Kreher, G. u. J. Hesselbach*: Arbeits- und Zugkraftbedarfs-
zahlen. In: KTBL (Hrsg.): KTBL-Kalkulationsunterlagen für
Betriebswirtschaft, Bd. 1, 4. Fortschr., Hauptregister III,
Wolfraatshausen/München: Neureuter 1969.
- [25] *Hammer, W.*: Ganzheitliche und kausale Betrachtung als
Grundlagen für Arbeitszeitstudien in der Landwirtschaft.
In: Aufgaben und Ergebnisse in der Landarbeitswissen-
schaft.
Schriftenreihe "Landarbeit und Technik", Heft 35, S. 11/45,
Hamburg und Berlin: Parey 1968.
- [26] *Gindele, E.H.*: Die Bedeutung agrarstruktureller Elemente
für eine rationelle Arbeiterledigung in der Landwirtschaft.
KTBL-Schrift 156, Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1972.
- [27] *Jäger, P.*: Vergleich von Arbeitszeitbedarf und Maschinen-
kosten in Betrieben mit geänderten Agrarstrukturdaten
– Programmbeschreibung und Benutzeranleitung.
Darmstadt: KTBL 1979.
- [28] *Rosegger, S. u. F.-P. Sörgel*: Ermittlung von technischen
und arbeitswirtschaftlichen Planungsdaten für die Feldwirt-
schaft.
Landbauforschung Völknerode Sh. 32 (1976).
- [29] *Heckmann, G.*: Systematisierung von Arbeitsverfahren
und Ermittlung von verfahrenstechnischen Daten (Funkti-
onen) in der Feldwirtschaft, Teil 1 und 2.
Stuttgart-Hohenheim: Inst. für Agrartechnik 1976.
- [30] *Auernhammer, H., J. Reinholz u. H. Zäh*: Planzeiten für die
Rinderhaltung.
Weihenstephan: Inst. für Landtechnik 1978.
- [31] Koordinierungsausschuß zur Vereinheitlichung betriebswirt-
schaftlicher Begriffe beim Bundesministerium für Ernährung,
Landwirtschaft und Forsten: Begriffs-Systematik für die
landwirtschaftliche und gartenbauliche Betriebslehre.
5. Aufl., Schriftenreihe des Hauptverbandes der Landwirt-
schaftlichen Buchstellen und Sachverständigen e.V. Bonn,
Heft 14, Bonn: Pflug und Feder 1973.
- [32] *Röhner, J.*: Zur Methodik der Zeitstudie in der Landwirt-
schaft. In: Methoden und Verfahren der Landarbeitswissen-
schaft.
Schriftenreihe "Landarbeit und Technik", Heft 21, S. 29/76,
Bad Kreuznach: 1956.
- [33] *Jahns, G., H. Steinkampf, G. Olfe u. H. Schön*: Einfluß
landwirtschaftlicher Parameter auf Zeit- und Energiebedarf
bei Schlepperarbeiten.
Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 4, S. 85/90.

Dielektrische Eigenschaften von Maiskörnern

Von Péter Sembery, Gödöllő, Ungarn*)

DK 633.004.12:621.317.33:633.15:664.8.047

Die Feuchtemessung auf kapazitivem Weg besitzt gegen-
über der herkömmlichen Trockenschrankmethode den
Vorteil, daß das Meßergebnis unmittelbar zur Verfügung
steht. Bei genügender Genauigkeit könnte ein solches
Meßverfahren eine Regelung von Trocknungsanlagen oh-
ne große Totzeiten ermöglichen.

Die Feuchtemessung auf kapazitivem Weg beruht auf der
starken Feuchteabhängigkeit der Dielektrizitätskonstan-
te des Gutes. Die Genauigkeit der Messung wird aber
auch von der Temperatur und der Dichte des Gutes be-
einflußt. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Feuchtemes-
sung wurden in Versuchen die Abhängigkeiten der Di-
elektrizitätskonstante von der Temperatur und der Diche-
te bestimmt.

1. Einleitung

Unerläßliche Voraussetzung für die moderne landwirtschaftliche
Produktion ist die Überwachung und Automatisierung technischer
Vorgänge. Länder, in denen es eine entwickelte Landwirtschaft
gibt, haben bedeutende Erfolge beim Automatisieren landwirt-
schaftlicher Verfahren und in der vorausgehenden Grundlagenfor-
schung erzielt. Wie das Konstruieren landwirtschaftlicher Maschi-
nen ohne die Kenntnis der mechanischen, thermodynamischen
und übrigen Eigenschaften des Bodens und anderer Stoffe unvor-
stellbar ist, so beruht auch das Instrumentieren und Automatisie-
ren auf der Kenntnis der elektrischen, thermodynamischen und
optischen Kennwerte. Die dielektrischen Eigenschaften gehören
zur Gruppe der elektrischen Kennwerte. Die Kenntnis der dielek-
trischen Eigenschaften von Gütern wird bei der Feuchtemessung
in verschiedenen Behandlungsverfahren genutzt.

In den letzten Jahrzehnten hat die dielektrische Feuchtemessung
von Gütern eine weite Verbreitung gefunden, zumal sie gegenüber
dem traditionellen Verfahren im Trockenschrank den bedeuten-
den Vorteil hat, daß sie schnell über den Feuchtegehalt von Kör-
nerfrüchten informiert.

Dieser Vorteil kann zur Verbesserung der Regelung von Trock-
nungsanlagen genutzt werden, weil die Wartezeiten wegfallen, die
mit der traditionellen Feuchtemessung verbunden sind. Die Rege-
lung kann weiterentwickelt werden, wenn der Feuchtefühler un-
mittelbar in der Trocknungsanlage montiert wird, da dadurch die
Totzeit bei der Regelung vermindert wird. Die Regelung von Trock-
nungsanlagen kann dann manuell oder automatisch erfolgen. In
Ungarn wird gegenwärtig noch die manuelle Regelung angewandt,
die automatische Regelung ist aber in Entwicklung.

*) *Dr.-Ing. Péter Sembery* ist Dozent am Lehrstuhl für Elektrifizie-
rung der Landwirtschaft (Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. Istvan
Mikecz) der Agrarwissenschaftlichen Universität Gödöllő, Ungarn.

2. Stand des Wissens

Die Erforschung dielektrischer Kennwerte von landwirtschaftlichen Gütern blickt auf eine fast 30jährige Entwicklung zurück. Zahlreiche Publikationen beschäftigten sich mit Untersuchungen über die Eigenschaften verschiedener Stoffe im elektrischen Feld. Der überwiegende Teil der Forschungen ist auf ein konkretes Ziel hin orientiert und beschäftigt sich kaum mit der umfassenden Analyse des Themenkreises. Nelson [1] faßte 1973 die im Themenkreis bis dahin erschienenen Forschungsergebnisse in einer kritischen Übersicht zusammen. Sein Beitrag beschäftigt sich außer mit den Körnerfrüchten auch mit den elektrischen Kennwerten tierischer Gewebe, Lebensmittel, Hölzer und sonstiger pflanzlicher Stoffe. Der Autor bemerkt, daß die mit verschiedenen Apparaturen durchgeführten Messungen schwer zu vergleichen sind und häufig die theoretische Untersuchung des Themas außer acht gelassen wird.

Zahlreiche amerikanische und andere Forscher beschäftigten sich mit den dielektrischen Eigenschaften von Körnerfrüchten und Halmfutter und veröffentlichten wertvolle Angaben über Meßmethoden und Ergebnisse in verschiedenen Frequenzbereichen [2 bis 11]. Die Publikationen beschäftigten sich in erster Linie mit der Abhängigkeit der dielektrischen Parameter von der Feuchte, aber sie gehen in einigen Fällen auch auf den Einfluß der Temperatur ein. Es sind dagegen nur selten Angaben zu finden, die sich auf den Einfluß der Dichte, der Porosität oder anderer Faktoren beziehen. Auch die Mehlprodukte aus den Körnerfrüchten wurden bisher kaum untersucht.

Zur Entwicklung der Feuchtemessung und der Trocknerregelung hielten wir es für notwendig, unsere Untersuchungen auf die zuletzt genannten Einflußgrößen zu lenken.

3. Untersuchungsmethode

Die Dielektrizitätskonstante beschreibt das Verhalten eines Stoffes im elektrischen Feld. Wenn das Gut zwischen Kondensatorplatten gelegt und an die Platten hochfrequente Wechselspannung geschaltet wird, wird die Stärke und die Phasenlage des über die Platten fließenden Stromes von der 'Dielektrizitätskonstante des Gutes' bestimmt, Bild 1.

Die Dielektrizitätskonstante ist eine komplexe Größe, die als Resultierende aus einem kapazitiven Anteil oder Realteil ϵ' und einem Imaginärteil ϵ'' , der die Höhe der dielektrischen Verluste angibt, geschrieben werden kann:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

Der Quotient der beiden Komponenten ergibt den Tangens des Verlustwinkels:

$$\tan \delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (2)$$

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ kann nach Bild 1 auch aufgeschrieben werden als:

$$\tan \delta = \frac{I_w}{I_m} = \frac{G}{\omega C} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'} \quad (3)$$

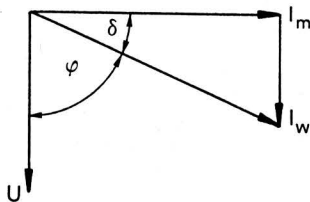


Bild 1. Zeigerdiagramm für einen verlustbehafteten Kondensator.

Die dielektrischen Kennwerte von Gütern werden außer von der Meßfrequenz und dem Feuchtegehalt auch von der Temperatur und der Dichte des Gutes beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen den dielektrischen und den physikalischen Kennwerten kann also nach folgendem Gleichungssystem gelöst werden:

$$\epsilon' = f(\omega, U, t, \rho) \quad (4)$$

$$\epsilon'' = f(\omega, U, t, \rho) \quad (5)$$

$$\tan \delta = f(\omega, U, t, \rho) \quad (6)$$

$$\sigma = f(\omega, U, t, \rho) \quad (7)$$

Die funktionalen Abhängigkeiten der dielektrischen Kennwerte können mit Hilfe der Gleichungen numerisch oder graphisch gelöst werden. Aufgrund der großen Anzahl von Meßergebnissen wurden die Abhängigkeiten graphisch dargestellt. Es wurde versucht, die Gleichungen der Kurven durch Regression zu bestimmen.

Messungen wurden mit einem Gütefaktormesser in einem Frequenzbereich von 50 kHz bis 40 MHz durchgeführt. An den Eingang des Meßgerätes wurden ein Meßkondensator und eine entsprechend ausgewählte Induktionsspule angeschlossen. Das Ersatzschema des so zusammengestellten Schwingkreises ist in Bild 2 dargestellt.

Die Messung erfolgt durch Abstimmung des Schwingkreises auf die Resonanzfrequenz. Die Abstimmung wird mit dem Kondensator C_x durchgeführt. Aus der Verschiebung des Resonanzpunktes der mit Gut angefüllten Meßzelle gegenüber der leeren Meßzelle und aus der Verminderung des Gütefaktors können der Realteil ϵ' und der Verlustfaktor des Gutes berechnet werden:

$$\epsilon' = \frac{C_o + C_a}{C_o} \quad (8)$$

$$\tan \delta = \frac{G_a}{\omega_o C_a} \quad (9)$$

Die zwischen dem Verlustfaktor, der Leitfähigkeit und der komplexen Dielektrizitätskonstante bestehenden Zusammenhänge sind:

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta \quad (10)$$

$$\sigma = \epsilon'' \omega \quad (11)$$

$$|\epsilon^*| = \sqrt{|\epsilon'|^2 + |\epsilon''|^2} \quad (12)$$

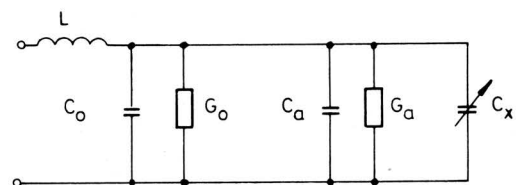


Bild 2. Ersatzschaltbild des Meßkreises.

C_o	Kapazität der leeren Meßzelle	G_o	Leitwert des unbelasteten Meßkreises
C_a	Kapazität des Gutes	G_a	Leitwert des Gutes
C_x	Abstimmkapazität	L	Induktivität

4. Die Ergebnisse der Untersuchungen

Die Untersuchungsergebnisse wurden graphisch und numerisch ausgewertet. Von den zahlreichen Ergebnissen sind die wichtigsten in Bild 3 bis 6 dargestellt.

Als Regressionsgleichungen wurden die folgenden Beziehungen für die Abhängigkeit von der Gutsfeuchte gefunden:

$$0,2 \text{ MHz} : \epsilon' = 1,526 \cdot 1,07^U \quad (R = 0,975) \quad (13)$$

$$2 \text{ MHz} : \epsilon' = 1,835 \cdot 1,044^U \quad (R = 0,934) \quad (14)$$

$$20 \text{ MHz} : \epsilon' = 1,880 \cdot 1,034^U \quad (R = 0,932) \quad (15)$$

Die Abhängigkeit von der Temperatur wird erfasst durch:

$$0,05 \text{ MHz} : \epsilon' = 3,398 \cdot 1,016^t \quad (R = 0,988) \quad (16)$$

$$0,2 \text{ MHz} : \epsilon' = 3,515 \cdot 1,009^t \quad (R = 0,934) \quad (17)$$

$$2 \text{ MHz} : \epsilon' = 3,230 \cdot 1,005^t \quad (R = 0,923) \quad (18)$$

$$40 \text{ MHz} : \epsilon' = 2,754 \cdot 1,003^t \quad (R = 0,887) \quad (19)$$

Zahlreiche Messungen wurden auch zur Untersuchung des Einflusses der Dichte und der Porosität durchgeführt. Es wurde festgestellt, daß die Abhängigkeit des Realteils der Dielektrizitätskonstante von der Dichte für die verschiedenen Körnerfrüchte nicht mit einem einfachen mathematischen Zusammenhang ausgedrückt werden kann.

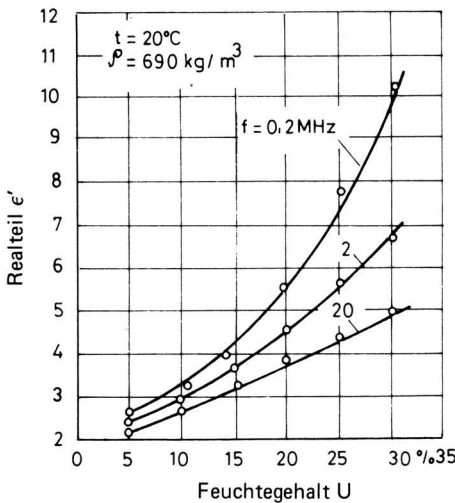


Bild 3. Realteil ϵ' der Dielektrizitätskonstante von Mais in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

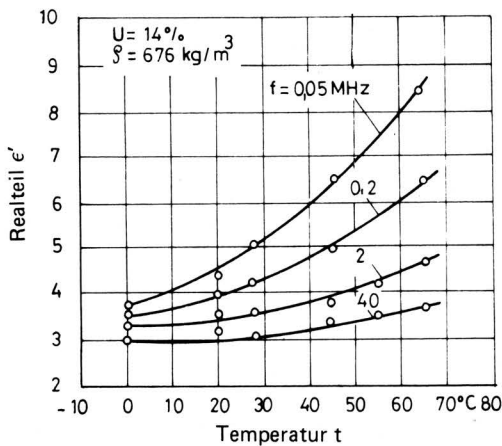


Bild 4. Realteil ϵ' der Dielektrizitätskonstante von Mais in Abhängigkeit von der Temperatur.

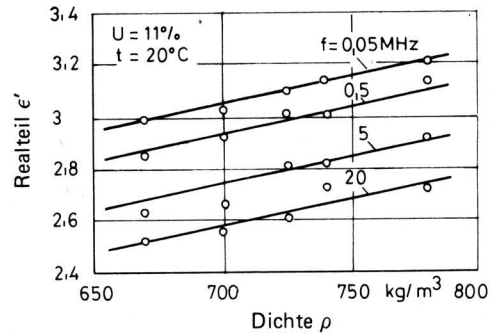


Bild 5. Realteil ϵ' der Dielektrizitätskonstante von Mais in Abhängigkeit von der Dichte.

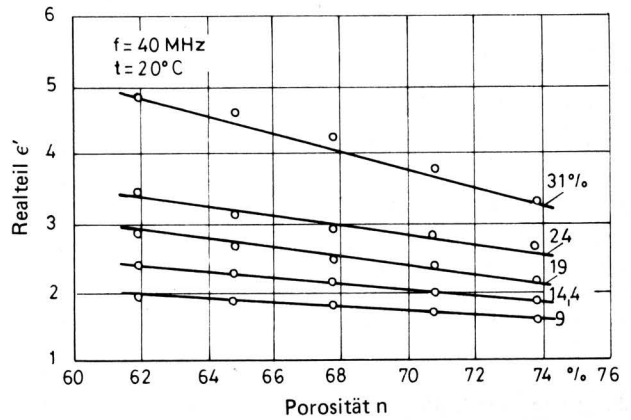


Bild 6. Realteil ϵ' der Dielektrizitätskonstante von Maiskolbenmehl in Abhängigkeit von der Porosität bei verschiedenem Feuchtegehalt.

Für ein spezielles Gut kann dagegen die Abhängigkeit zwischen Realteil ϵ' und der Dichte bzw. der Porosität mit einer Geraden gut approximiert werden, **Bild 7**.

Die letzte Abhängigkeit scheint zu bestätigen, daß es günstig ist, den Feuchtegehalt der Güter in gemahlenem Zustand zu messen. In dieser Form ist es nämlich nicht nötig, die Feuchtemeßgeräte mit einer sich auf die einzelnen Güter beziehenden Skala zu versehen. Der Unterschied zwischen den Gütern kann nach der Dichte korrigiert werden. Wenn ein Unterschied zwischen den dielektrischen Kennwerten von zwei Mahlprodukten gleichen Feuchtegehaltes festgestellt wird, kann die Abweichung nur durch den Unterschied in der Dichte verursacht sein. Die Kenntnis der Korrekturfaktoren erlaubt eine einheitliche Skala, ergänzt durch je eine Korrekturtafel für die Dichte wie für die Temperatur.

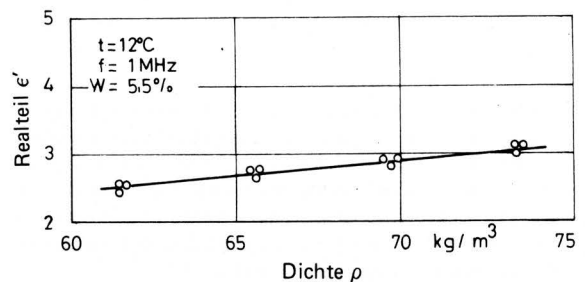


Bild 7. Realteil ϵ' der Dielektrizitätskonstante von Weizen-, Mais- und Luzernenmehl in Abhängigkeit von der Dichte.

5. Anwendung

Unsere Untersuchungsergebnisse wurden bei der Aufnahme der Feuchtigkeitsskalen von Gutsfeuchtemeßgeräten erfolgreich angewandt. Die Feuchtigkeitsskala wurde nach der Charakteristik der dielektrischen Kennwerte aufgenommen. Da der Wert des Verlustfaktors bei einem höheren Feuchtegehalt nicht unberücksichtigt bleiben darf, kann die Feuchtigkeitsskala nicht mit der realen, sondern muß mit der komplexen Dielektrizitätskonstante aufgenommen werden.

Die Genauigkeit der Feuchtemessung wird von der Veränderung der Temperatur und des Volumens des Gutes bestimmt. Bei den tragbaren Feuchtemessern ist der Fehler nach Messung der Temperatur und der Dichte mit Hilfe von Tafeln zu korrigieren. Bei einem in die Trocknungsanlage eingebauten Feuchtemesser kann das unmittelbar so nicht gelöst werden. In Kenntnis der an einer angegebenen Stelle der Trocknungsanlage vorherrschenden Temperatur kann aber die Feuchtigkeitsskala des Gerätes von vornherein an die gegebene Stelle angepaßt werden.

Das von uns entwickelte Meßsystem mißt die Kornfeuchte an zwei oder mehr Stellen der Trocknungsanlage. Für verschiedene Typen von Trocknungsanlagen wurden Fühler sonden unterschiedlicher Form entwickelt. **Bild 8** stellt eine in den Aufgabetrichter einer Turmtrocknungsanlage eingebaute Sonde dar. Im Inneren der Trocknungsanlage wurde eine einfache Stabsonde verwendet. Die Kapazitätsänderung der Sonde wird von einem hochfrequenten Brückenstromkreis ausgewertet und nach Verstärkung auf eine Anzeige oder ein Registriergerät gebracht. Die Meßgenauigkeit des Gerätes wurde über die Auswirkungen der zu erwartenden Temperatur- und Dichteschwankungen auf die Dielektrizitätskonstante abgeschätzt. Bei den in der Praxis auftretenden Veränderungen beträgt die Meßtoleranz $\pm 0,5\%$ Feuchtegehalt.

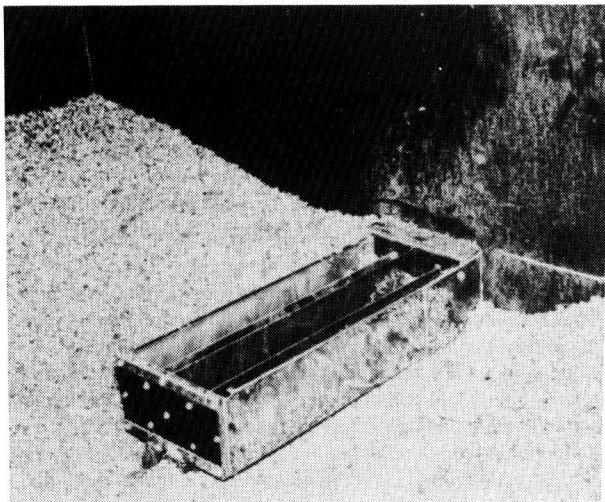


Bild 8. Feuchtefühler, der in den Aufgabetrichter einer Trocknungsanlage eingebaut ist.

6. Zusammenfassung

Bei der Erhöhung des Wirkungsgrades von Trocknungsanlagen spielt das kontinuierliche Messen des Feuchtegehaltes des Gutes eine wichtige Rolle. Verwendet werden können dazu in Trocknungsanlagen eingebaute Feuchtefühler, denen die Messung der Kapazität zugrunde liegt. Die gemessene Kapazität hängt von der Dielektrizitätskonstante des Gutes ab, die mit dem Feuchtegehalt des Gutes in engem Zusammenhang steht.

Die Meßgenauigkeit wird dadurch verringert, daß die dielektrische Konstante auch von der Temperatur und dem Massenvolumen des Gutes abhängig ist. Über diese Zusammenhänge gibt es im Schrifttum kaum Angaben.

In Untersuchungen wurde die Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von Körnermais und anderer Güter von dem Feuchtegehalt, der Temperatur, der Dichte und der Meßfrequenz bestimmt. Im vorliegenden Beitrag sind die Meßergebnisse für Mais dargestellt. Die Ergebnisse sind beim Aufstellen der Skalen von Feuchtemeßgeräten und bei der Korrektur der durch Temperatur- und Dichteänderungen herbeigeführten Meßfehler erfolgreich anzuwenden.

Das von uns entwickelte Gerät, an beliebiger Stelle der Trocknungsanlage eingebaut, mißt den Feuchtegehalt des Gutes mit einer Toleranz von $\pm 1\%$ Feuchtegehalt. Als Signalgeber ist es geeignet, kontinuierlich Meßsignale an ein automatisches Regelsystem zu liefern.

Verwendete Formelzeichen

C	Kapazität
G	Leitwert
I_w	Wirkstrom
I_m	Blindstrom
L	Induktivität
U	Feuchtegehalt; in Bild 1: Spannung
t	Temperatur
ϵ^*	komplexe Dielektrizitätskonstante
ϵ'	Realteil (kapazitiver Anteil) der Dielektrizitätskonstante
ϵ''	Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante
δ	Verlustwinkel
ω	Kreisfrequenz
ρ	Dichte
σ	elektr. Leitfähigkeit

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Nelson, S.O.: Electrical properties of agricultural products – a critical review. Trans. ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 2, S. 384/400.
- [2] Ahlgrimm, H.J.: Ein Beitrag zur dielektrischen Bestimmung des Feuchtegehaltes an sehr feuchten organischen Stoffen. Grundl. Landtechnik Bd. 25 (1975) Nr. 6, S. 165/72.
- [3] Ahlgrimm, H.J.: Die Grenzen und Möglichkeiten der dielektrischen Feuchtegehaltsbestimmungen an Futterstoffen im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 50 MHz. Grundl. Landtechnik Bd. 29 (1979) Nr. 1, S. 25/32.
- [4] Chugh, R.K., S.S. Stuchly u. M.A. Rzepecka: Dielectric properties of wheat at microwave frequencies. Trans. ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 5, S. 906/909, 913.
- [5] Cocoran, P.T., S.O. Nelson, L.E. Stetson u. C.W. Schlaphoff: Determining dielectric properties of grain and seed in the audiofrequency range. Trans. ASAE Bd. 13 (1970) Nr. 3, S. 348/51.
- [6] Jorgensen, J.L., A.R. Edison, S.O. Nelson u. L.E. Stetson: A bridge method for dielectric measurements of grain and seed in the 50 – to 250 MHz – range. Trans. ASAE Bd. 13 (1970) Nr. 1, S. 18/20.
- [7] Nelson, S.O.: Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50 MC range. Trans. ASAE Bd. 8 (1965) Nr. 1, S. 38/48.
- [8] Nelson, S.O.: A system for measuring dielectric properties at frequencies from 8,2 to 12,4 GHz. Trans. ASAE Bd. 15 (1972) Nr. 6, S. 1094/98.
- [9] Sembery, P.: Dielektrische Eigenschaften des Mais im Frequenzbereich von 50 kHz – 40 MHz. (Orig.: Ungar.) Jarmüvek, mezőgazdasági gepek (1977).
- [10] ● Sembery, P.: Dielektrische Kennwerte von landwirtschaftlichen Körner- und Halmstoffen. (Orig.: Ungar.). Budapest: Akademiai Kiado (Akademieverlag) 1979, 81 S.
- [11] Stetson, L.E. u. S.O. Nelson: A method for determining dielectric properties of grain and seed in the 200 – to 500 MHz – range. Trans. ASAE Bd. 13 (1970) Nr. 4, S. 491/95.