

Für ein Rührsystem wird der Einfluß der kinetischen Parameter auf den Suspensionsvorgang aufgezeigt und in Form von Potenzfunktionen dargestellt. Das Mischen mit einer für beide Gemischarten (fest/flüssig und flüssig/flüssig) geeigneten Rührgeometrie zeigt, daß der zum Aufrühren sedimentierten Feststoffes erforderliche auf das Behältervolumen bezogene Flüssigkeitsdurchsatz bzw. die Leistungsdichte die beim Emulgieren erforderlichen Leistungsdaten übersteigt.

Das Problem der Schaumbildung beim hydraulischen Rühren wird in Verbindung mit dem Aufrühren ebenfalls kurz angesprochen und daraus resultierend eine Weiterentwicklung der hydraulischen Rührsysteme vorgestellt. Durch diese Einrichtung kann, insbesondere zur Vermeidung übermäßiger Schaumbildung, während der Behälterentleerung eine Anpassung der zugeführten hydraulischen Leistung an die tatsächliche Behälterfüllung erfolgen und dadurch ein Beitrag zur Erhöhung der Arbeitsqualität von Pflanzenschutzgeräten geleistet werden.

Verwendete Formelzeichen

C	Konstante
d	Durchmesser
K_E	kinetische Einflußgrößen
m, n, κ	Exponenten
p	Druck
P	Hydraulische Leistung
Q	Flüssigkeitsdurchsatz
t_R	Rührdauer
V	Volumen
x	Abstand der Rührdüsen
φ	Anteil des suspendierten Feststoffs

Indizes

A	Ausleger
B	Behälter
D	Rührdüsen
h	horizontal
H	Rührsystem in Praxis (Haupt)-Ausführung
M	Rührsystem in Modell-Ausführung.
O	Bezugsgröße
P	Pumpe
R	Rücklauf
v	vertikal

Schrifttum

- [1] *Akesson, N.B., W.E. Yates u. S.W. Boos:* System for handling toxic liquid pesticide formulations. ASAE-Paper (1976) No. 76-1504.
- [2] *Schmidt, M.:* Technische Maßnahmen zur Verbesserung der Umweltfreundlichkeit bei Pflanzenschutzverfahren. Landtechnik Bd. 33 (1978) Nr. 3, S. 114/17.
- [3] *König, A.H.:* Untersuchungen über das hydraulische Mischen von Suspensionen in Brühebehältern von Pflanzenschutzgeräten. Diss. Univ. Göttingen 1953.
- [4] *Yates, W.E. u. N.B. Akesson:* Hydraulic agitation requirements for pesticide materials. Trans. ASAE Bd. 6 (1963) Nr. 3, S. 202/205 u. 208.
- [5] *Rácz, I.G., P.J. Dees u. J.G. Wassink:* Suspendieren von Feststoffpartikeln in axialen Strahlmischern. Chem.-Ing.-Technik Bd. 49 (1977) Nr. 10, S. 841, (MS 531/77).
- [6] *Mersmann, A., W.-D. Einkenel u. M. Käppel:* Auslegung und Maßstabsvergrößerung von Rührapparaten. Chem.-Ing.-Technik Bd. 47 (1975) Nr. 23, S. 953/64.
- [7] *Uhl, G.:* Rührwerke für gleichbleibende Konzentrationen. Lohnunternehmen Bd. 31 (1976) Nr. 12, S. 474/86.

Die Grenzen und Möglichkeiten der dielektrischen Feuchtegehaltsbestimmung an Futterstoffen im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 50 MHz

Von Heinz-Jürgen Ahlgrimm, Braunschweig-Völkenrode*)

DK 633.004.12:621.317.33

Bei der dielektrischen Feuchtegehaltsbestimmung wird der Zusammenhang zwischen dem Ansteigen der dielektrischen Meßwerte und der Feuchte eines Stoffes genutzt. Für eine Vielzahl von Stoffen wird dieser Zusammenhang jedoch durch zahlreiche stoffspezifische Parameter gestört. Über den Einfluß von Gutfeuchte und -dichte, der chemischen Zusammensetzung und der Meßfrequenz im Bereich zwischen 100 Hz und 50 MHz auf

die dielektrischen Meßwerte von frischem Halmgut berichtet diese Arbeit. Aufgrund der Meßergebnisse zeichnet sich unter bestimmten Voraussetzungen eine Lösungsmöglichkeit für die dielektrische Feuchtegehaltsbestimmung ab.

1. Einleitung

Von den verschiedenen Verfahren zur Feuchtegehaltsbestimmung wird das dielektrische aufgrund zahlreicher Vorteile gegenüber anderen Verfahren für zahlreiche Stoffarten bereits mit Erfolg genutzt [1]. Für eine Feuchtegehaltsbestimmung an Saatgut, Getreide und ähnlichen pflanzlichen Stoffen hat es sich bereits seit langem bewährt [2 bis 7]; für bestimmte Nahrungsmittel ist es ebenfalls anwendbar [8, 9].

*) Dr. rer. nat. Heinz-Jürgen Ahlgrimm ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

Das Meßprinzip ließ sich bisher jedoch nicht auf ebenfalls in der Landwirtschaft zahlreich vorkommende sehr feuchte, heterogene Stoffgemenge unterschiedlicher Beschaffenheit, wie z.B. auf Haufwerke aus Frischfutter, Silage, Abfallstoffen usw. übertragen. Über die dielektrischen Eigenschaften faseriger Haufwerke ist bisher auch nur wenig bekannt [10, 11, 12]. In einer früheren Arbeit hat der Verfasser auf die möglichen Grenzen für die dielektrische Feuchtegehaltsbestimmung an derartigen Stoffen bereits hingewiesen [10]. So ergaben Messungen des Realteils ϵ' und des Verlustfaktors ϵ'' an Feuchtgut zwar die gewünschte Feuchteabhängigkeit, wonach beide mit dem Feuchtegehalt ansteigen, gleichzeitig stellte sich jedoch auch eine starke Abhängigkeit von der Meßfrequenz wie auch von der Gutart, Dichte und anderen Stoffgrößen heraus. Im folgenden wird über die Fortsetzung dieser Untersuchungen berichtet.

2. Meßmethodik

Als mögliches Maß für den Feuchtegehalt eines Gutes dienen der reelle Anteil ϵ' (Realteil) und der imaginäre Anteil ϵ'' (Verlustfaktor) der komplexen, relativen Dielektrizitätskonstanten (mit $j = \sqrt{-1}$)

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

sowie das häufig benutzte Verhältnis beider Größen, der Verlusttangens

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

Wesentliches Element eines diesbezüglichen elektrischen Meßkreises ist ein Meßkondensator, Bild 1, der das Meßgut enthält. Mit Hilfe eines Vektorimpedanzmeters können die elektrischen Meßwerte des Kondensators erfaßt und somit die dielektrischen Größen des Meßgutes ermittelt werden.

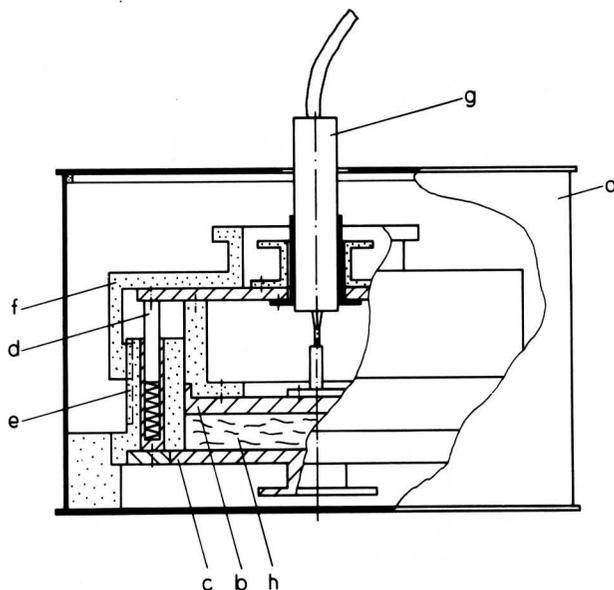


Bild 1. Schnittbild des Meßkondensators.

- a Messinggehäuse mit Deckel (Abschirmung)
- b Elektrodenhalter mit oberer Meßelektrode
- c Untere Meßelektrode
- d Führungs- und Kontaktbolzen mit Druckfeder
- e Meßgutbehälter (Polyäthylen) mit Schraubgewinde
- f Schraubdeckel (Polyäthylen) mit Höhenteilung
- g Adapter der Meßgeräte
- h Meßgut

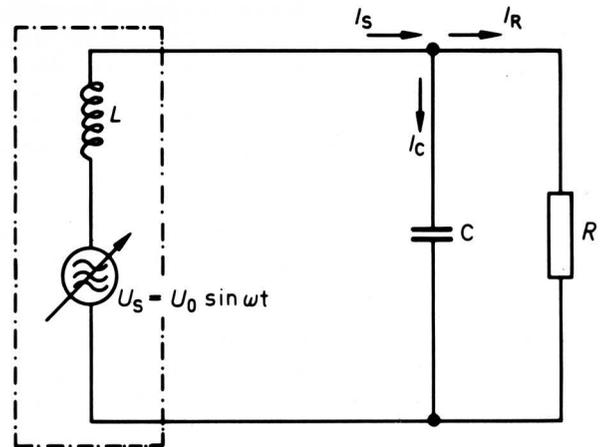


Bild 2. Ersatzschaltbild des elektrischen Meßkreises.

Bild 2 zeigt hierzu das physikalische Ersatzschaltbild des gesamten Meßkreises:

Der Strom I_S aus der Spannungsquelle U_S durchfließt die nur bei höheren Frequenzen zu berücksichtigende Meßkopfinduktivität L des Impedanzmeters und verzweigt sich anschließend in einen kapazitiven Blindstrom I_C und einen Wirkstrom I_R . Die Kapazität C des Meßkreises ist bis auf die additive Streukapazität C_S dem Realteil ϵ' (Anteil an der Dielektrizitätskonstanten infolge der Orientierung polarer Moleküle im Meßgut [10]) proportional:

$$\epsilon' = \frac{C - C_S}{C_0} \quad (3)$$

Die durch Molekülstoß, Ladungstransport usw. verursachten dielektrischen Verluste des Meßgutes symbolisiert der Parallelwiderstand R . Bei der Frequenz $f = \omega/2\pi$ ergibt sich der Verlustfaktor ϵ'' aus

$$\epsilon'' = \frac{1}{R C_0 \omega} \quad (4)$$

Die in Gln. (3) und (4) auftretende theoretische Leerlaufkapazität C_0 kann aus den Kondensatorabmessungen leicht errechnet werden, während die Streukapazität C_S in einem Leerversuch gemessen werden muß.

Aus der Messung der Impedanz Z (komplexer Widerstand) des Meßkreises

$$Z = \frac{[R^2 + \omega^2 (L (1 + \omega^2 C^2 R^2) - C R^2)^2]^{1/2}}{(1 + \omega^2 C^2 R^2)} \quad (5)$$

und des zwischen der erregenden Spannung U_S und dem Strom I_S auftretenden Phasenwinkels φ

$$\varphi = \arctan \frac{\omega [L (1 + \omega^2 C^2 R^2) - C R^2]}{R} \quad (6)$$

werden die Kreisgrößen C und R und somit die dielektrischen Größen ϵ' , ϵ'' und $\tan \delta$ mit Hilfe eines programmierbaren Kleinrechners ermittelt.

Durch den Einsatz eines zweiten Vektorimpedanzmeters konnte nunmehr der Meßbereich über den bisherigen Frequenzbereich (500 kHz bis 100 MHz) [10] hinaus weit in den Bereich kleinerer Frequenzen (< 500 kHz) ausgedehnt werden.

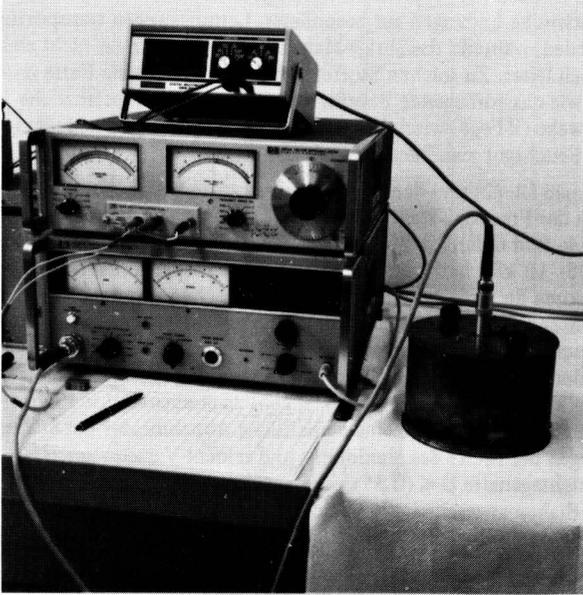


Bild 3. Meßplatz für die dielektrischen Messungen, rechts: Meßkondensator, links von unten nach oben: Vektorimpedanzmeter 0,5–100 MHz, Vektorimpedanzmeter 5 Hz–500 kHz, Digitalvoltmeter.

Bild 3 zeigt den Meßplatz mit den beiden Vektorimpedanzmetern, dem Meßkondensator und einem Digitalvoltmeter zur thermoelektrischen Bestimmung der Meßguttemperatur. Zur Ermittlung des Einflusses der physikalischen und chemischen Meßgutbeschaffenheit wurde in Ergänzung zu den früheren Untersuchungen durch bestimmte Behandlungsmaßnahmen, Erntezeitpunkte und chemische Analysen definiertes Meßgut verwendet.¹⁾

Es handelt sich dabei um Häckselgut (theoretische Länge ca. 6 mm) verschiedener Gras-, Mais- und Luzernevarianten. Der Dichteinfluß auf die dielektrischen Meßwerte [10] wurde durch die Verwendung zweier Gutdichten ($\rho = 0,25$ u. $0,3 \text{ g/cm}^3$) berücksichtigt.

Vor Versuchsbeginn mußte das tiefgefrorene, frische Meßgut jeweils in einem Polyäthylenbeutel unter Luftabschluß aufgetaut und auf Raumtemperatur ($295 \pm 2 \text{ K}$) erwärmt werden. Die anschließende Trocknung des Meßgutes erfolgte in perforierten Behältern im Meßraum bei zeitweiser Konditionierung der Raumluft zur Einstellung verschiedener Gutfeuchtegehalte.

Die Meßguteinwaage betrug jeweils 19 g, wobei sich der Plattenabstand aus den geforderten Dichten und den Kondensatorabmessungen ergab. Mit demselben Meßgut wurden zunächst die Messungen bei der kleineren Dichte bei etwa 20 diskreten Frequenzen zwischen 100 Hz und 100 MHz, danach in gleicher Weise bei der höheren Dichte von $\rho = 0,3 \text{ g/cm}^3$ durchgeführt.

Im Anschluß daran diente ein Teil des Kondensatorinhalts zur Bestimmung des Feuchtegehalts mit mindestens 3 Parallelproben nach der Ofenstandardmethode (24 h, 378 K).

Die Streuungen in der Feuchtegehaltsbestimmung fielen zumeist gering aus. Hingegen streuten die dielektrischen Meßwerte in einem engen Feuchtebereich oftmals stärker als es den Änderungen im Feuchtegehalt entspricht. Die Abweichungen betragen z.T. weit mehr als 10 % und sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen:

¹⁾ Für die Bereitstellung des Versuchsmaterials wie auch für die Überlassung der Analyseergebnisse sei Herrn Dipl.-Landwirt U. Küntzel vom Institut für Grünlandwirtschaft, Futterbau und Futterkonservierung der FAL herzlich gedankt.

Die Hauptursache liegt in der Inhomogenität des Probenmaterials, deren Wirkung durch die Verringerung der Meßguteinwaage auf etwa 1/3 der früher [10] verwendeten Gutmenge verstärkt wird. Durch die begrenzte Ablesegenauigkeit des Phasenwinkels φ von $\pm 0,5$ Grad am Meßgerät tritt ein weiterer Fehler auf, der sich insbesondere bei niedrigen Feuchtegehalten und hohen Frequenzen (kleine dielektrische Meßwerte) stärker auswirken kann. Deshalb wurde auch auf eine Auswertung der Messungen bei 100 MHz verzichtet. Eine Verminderung der Streuungen durch eine Erhöhung der Probenanzahl pro Meßreihe oder Wiederholung von Messungen war wegen der Erweiterung des Meßumfanges (z.B. Frequenzbereich) nicht möglich. Dennoch beeinflussen die auftretenden Streuungen nicht die weiteren generellen Aussagen dieser Arbeit.

3. Meßergebnisse

Die nachfolgende Darstellung und Diskussion von Meßergebnissen beschränkt sich wegen des großen Umfangs auf einige typische Beispiele.

3.1 Die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Größen

In **Bild 4** ist der Realteil ϵ' der Dielektrizitätskonstanten über der Frequenz für verschiedene Feuchtegehalte bei der kleineren Dichte von $0,25 \text{ g/cm}^3$ für eine Grasvariante aufgetragen. Er erreicht bei der tiefsten Meßfrequenz von 100 Hz für sehr feuchtes Häckselgut Werte von mehr als 10^5 . Reines Wasser zeigt dagegen im gesamten Frequenzbereich einen konstanten Wert von 80 bei 293 K. Die hohen frequenzabhängigen Werte des Meßgutes deuten somit auf starke Wechselwirkungsprozesse des Wassers mit der Trockensubstanz hin. Mit sinkendem Feuchtegehalt nehmen jedoch auch die ϵ' -Werte ab.

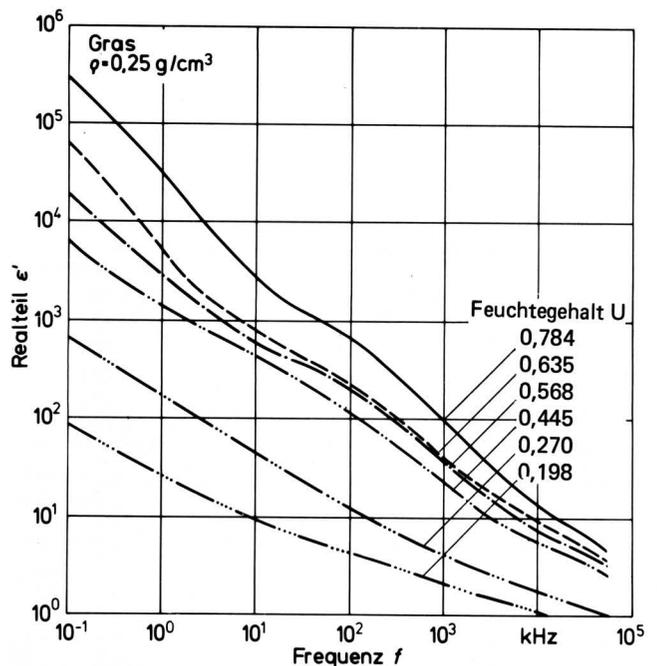


Bild 4. Frequenzabhängigkeit des Realteils ϵ' in einem weiten Frequenzbereich.

Die Kurven für den Realteil ϵ' zeigen in dieser Darstellung teilweise ein nichtlineares Verhalten. Für sehr feuchtes Gut ist in den Frequenzbereichen zwischen 5 und 10 kHz sowie zwischen 2,5 und 5 MHz eine stärkere Abnahme von ϵ' zu beobachten. Diese beiden Dispersionsbereiche wie auch die sehr hohen ϵ' -Werte hängen u.a. mit der zellularen bzw. fibrillaren Struktur zahlreicher organischer Stoffe zusammen [13] und können wohl nicht allein durch Makromoleküle und Kolloide verursacht werden, wie früher [10] angenommen wurde.

An elektrisch schlecht leitenden Membranen von Zellen und Zellbestandteilen finden durch die wesentlich besser leitenden Innen- und Außenmedien mit den Feldwechseln des Hochfrequenzfeldes periodische Aufladungen statt, die zu sehr hohen Dipolmomenten und damit zu sehr hohen Dielektrizitätskonstanten des Stoffes führen. Da der Aufladevorgang eine bestimmte Zeit (entsprechend der Zeitkonstante eines RC-Gliedes) erfordert, wird er mit steigender Frequenz immer unvollständiger und somit das Dipolmoment bzw. die Dielektrizitätskonstante immer kleiner. Dies ist möglicherweise der Grund für die zweite Dispersion von ϵ' bei etwa 2,5 MHz (β -Dispersion). Als Ursache für den ersten Dispersionsbereich bei etwa 5 kHz (α -Dispersion) können Polarisationserscheinungen infolge einer hohen elektrischen Leitfähigkeit auf der Oberfläche von Membranen angesehen werden, was ebenfalls zu hohen Dipolmomenten führt [14].

Die Abnahme dieser Effekte mit sinkendem Wassergehalt (Wasser als Träger des Leitungsmechanismus) könnte aus der Wirkung von Membranen und Grenzflächen erklärt werden. Für trockene oder nahezu trockene Stoffe verschwinden die Dispersionsbereiche vollständig.

Der dielektrische Verlustfaktor ϵ'' steigt zu tiefen Frequenzen hin ebenfalls sehr stark, Bild 5, an und erreicht dort immer sehr viel höhere Werte als ϵ' . Er kann für sehr feuchtes Gut mehr als 10^6 betragen. Im Gegensatz zum Realteil ϵ' zeigt die Abhängigkeit des Verlustfaktors bei doppelt logarithmischer Darstellung fast immer eine nahezu lineare Charakteristik. Diese Linearität entspricht einer exponentiellen Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors gemäß

$$\epsilon'' = \frac{A}{fk} \quad (7)$$

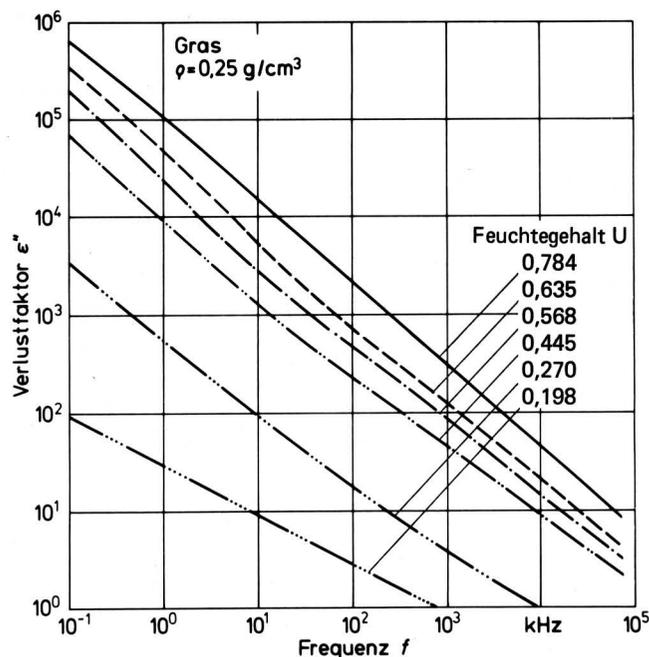


Bild 5. Frequenzabhängigkeit des dielektrischen Verlustfaktors ϵ'' in einem weiten Frequenzbereich.

und ist nach [15] typisch für heterogene Substanzen, in denen elektrische Ladungen auf besonderen Leitungswegen transportiert werden, während das übrige Material schlecht oder gar nicht elektrisch leitet. Zu solchen Stoffen gehören u.a. tierische Fette und – wie das vorliegende Beispiel zeigt – wohl auch pflanzliche Gewebe (k liegt zwischen 0,5 und 1 [15], nach eigenen Messungen an Feuchtgut zwischen 0,7 und 0,9).

Gemäß Gl. (2) und dem Verhalten von ϵ' und ϵ'' in Abhängigkeit von der Frequenz stellt sich für $\tan \delta$ als Quotient beider Größen die in Bild 6 dargestellte Abhängigkeit ein: Als Folge der für ϵ' für ca. 5–10 kHz und 2,5 MHz auftretenden Dispersionen sind zwei Maxima für $\tan \delta$ in diesen Frequenzbereichen zu beobachten. Während für das zweite Maximum die $\tan \delta$ -Werte mit sinkendem Feuchtegehalt absolut gesehen abnehmen und sich das Maximum in den Bereich kleinerer Frequenzen verschiebt, zeigt das erste Maximum (bei kleineren Frequenzen) zwar ebenso eine Frequenzverschiebung, jedoch keine einheitliche Abnahme der $\tan \delta$ -Werte. Wegen der Breite des Maximums und seinem Verschwinden für Feuchtegehalte $U \leq (0,35) - 0,4$ wurde von dem ursprünglichen Vorhaben abgesehen, die Verschiebung als Maß für den Feuchtegehalt zu verwenden [10].

Für andere Gutarten wurden prinzipiell qualitativ sehr ähnliche Frequenzabhängigkeiten der dielektrischen Größen beobachtet; es treten z.T. nur starke Unterschiede hinsichtlich der Höhe der Absolutwerte und der Lage der Dispersionsbereiche bzw. der Maxima für $\tan \delta$ auf. Auf eine weitere Darstellung und Diskussion dieser Abhängigkeiten bei anderen Gutarten wird daher verzichtet.

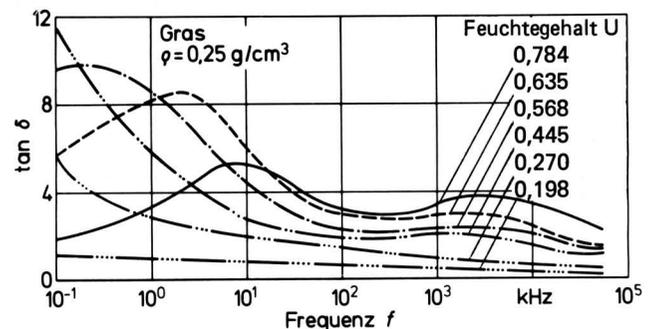


Bild 6. Frequenzabhängigkeit von $\tan \delta$ in einem weiten Frequenzbereich.

3.2 Die Feuchteabhängigkeit der dielektrischen Meßwerte

Die dielektrischen Größen Realteil ϵ' , Verlustfaktor ϵ'' und $\tan \delta$ steigen prinzipiell mit dem Feuchtegehalt des Gutes an [10]. In Bild 7 wird dieser Anstieg für ϵ' und ϵ'' bei drei verschiedenen Meßfrequenzen dargestellt. Für andere Gutarten verläuft die Abhängigkeit ähnlich; es bestehen jedoch sehr starke, von der Meßfrequenz und der jeweiligen Gutbeschaffenheit abhängige quantitative Unterschiede, wie später noch zu diskutieren sein wird. Bild 8 zeigt bei einer linearen Teilung der Ordinate den charakteristischen Verlauf der Feuchteabhängigkeiten von ϵ' und ϵ'' am Beispiel von Grünroggenhäcksel viel besser als bei logarithmischer Teilung (vergl. auch Bild 10 und 13). Eine (hypothetische) Deutung kann wie folgt gegeben werden:

Die ersten Spuren von Wasser werden im trockenen Meßgut häufig so stark gebunden und somit seine dielektrischen Eigenschaften so stark verändert, daß es bis zu Feuchtegehalten $U \leq 0,1$ nicht nachzuweisen ist. Erst danach stellt sich dann ein schwacher Anstieg von ϵ' und ϵ'' ein, der wahrscheinlich durch eine nun stattfindende Vergrößerung von Dipolmomenten von Ionen, Molekülen und Molekülgruppen durch die Anlagerung von Wasser verursacht wird. Der Anstieg verstärkt sich mit zunehmendem Feuchtegehalt, man erkennt einen Proportionalbereich (zumindest für ϵ'), der auf die

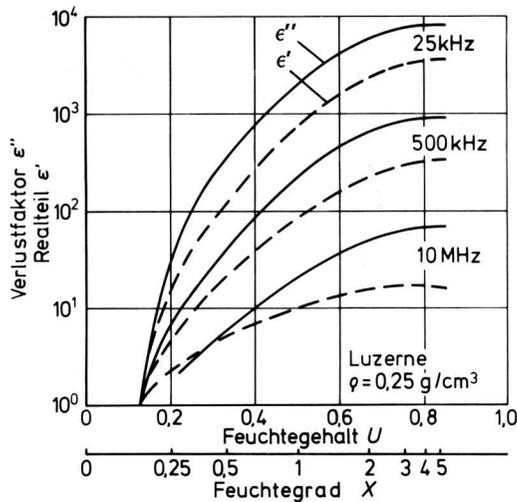


Bild 7. Feuchteabhängigkeit des Realteils ϵ' und des Verlustfaktors ϵ'' einer Luzernevariante bei drei verschiedenen Frequenzen.

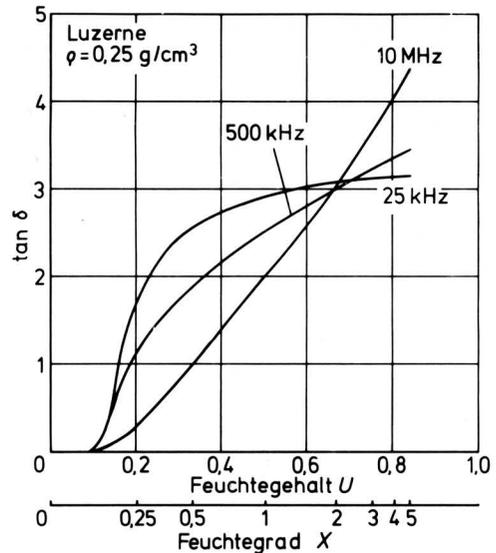


Bild 9. Feuchteabhängigkeit von $\tan \delta$ für verschiedene Frequenzen an einer Luzernevariante.

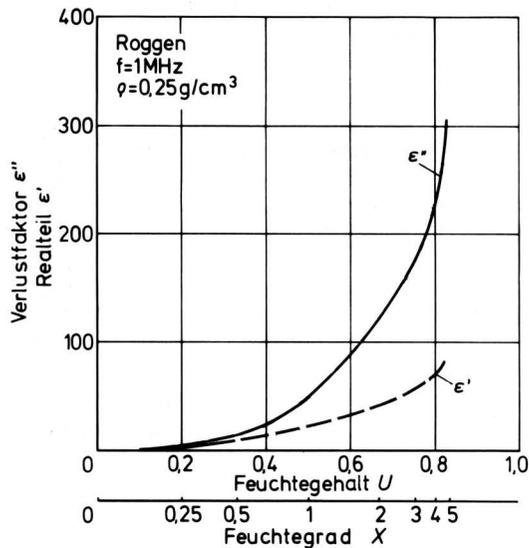


Bild 8. Feuchteabhängigkeit des Realteils ϵ' und des Verlustfaktors ϵ'' an Grünroggenhäcksel bei 1 MHz.

zunehmende Einlagerung von freiem Wasser zurückgeführt werden muß. Anschließend können ϵ' und ϵ'' infolge einer zunehmenden Ausfüllung des Luftporenraumes durch Wasser und einer damit verbundenen besseren kapazitiven Kopplung benachbarter Gutteilchen untereinander bei sehr hohen Feuchtegehalten überproportional ansteigen [8, 10] (vergl. auch Bild 10 und 13). Für $\tan \delta$ läßt sich ebenso ein Anstieg der Meßwerte mit dem Feuchtegehalt beobachten [10], doch hängt die Form des Anstiegs sehr wesentlich von der jeweiligen Meßfrequenz ab, **Bild 9**.

Die Abhängigkeiten von $\tan \delta$ für die anderen untersuchten Gutarten verlaufen sehr ähnlich. Auch hier treten durch die jeweilige Gutbeschaffenheit graduelle Unterschiede auf.

Für die dielektrische Feuchtegehaltsbestimmung würde sich demnach die nahezu lineare Charakteristik bei 10 MHz natürlich am besten eignen. Welche weiteren Faktoren jedoch noch eine Rolle spielen können, zeigen die nächsten beiden Abschnitte.

3.3 Die Dichteabhängigkeit der dielektrischen Meßwerte

Über die starke Dichteabhängigkeit der dielektrischen Meßgrößen war schon früher berichtet worden [10], insbesondere steigen ϵ' und ϵ'' bei geringfügigen Dichteerhöhungen sehr stark an. Dies kann für den Realteil ϵ' sehr deutlich aus **Bild 10** für Grünroggenhäcksel entnommen werden.

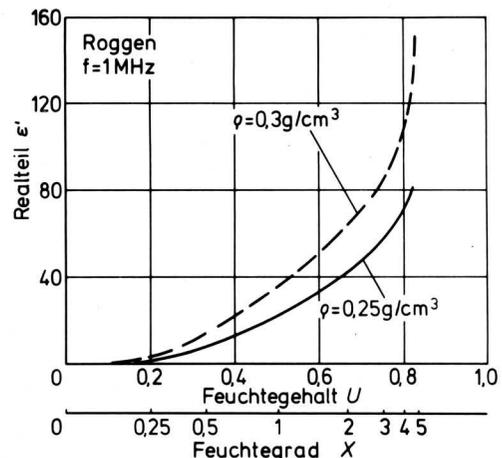


Bild 10. Feuchteabhängigkeit des Realteils ϵ' bei zwei verschiedenen Dichten an Grünroggenhäcksel bei 1 MHz.

Die starke Dichteabhängigkeit ist bei allen Gutarten für den Realteil der Dielektrizitätskonstanten und für den dielektrischen Verlustfaktor typisch. Allein schon von der Theorie dielektrischer Messungen her war ein derartiges Verhalten zu erwarten, weil in die Berechnung der Dielektrizitätskonstanten die in der Volumeneinheit enthaltene Molekülanzahl bzw. Dipolanzahl eingeht, die natürlich mit der Dichte ansteigt [10].

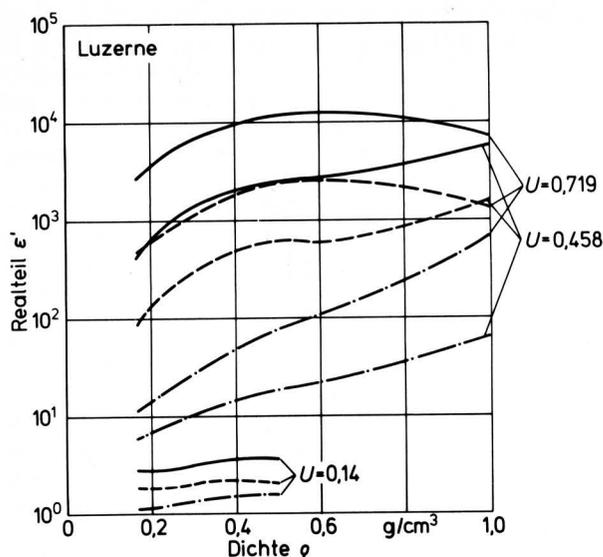


Bild 11. Dichteabhängigkeit des Realteils ϵ' bei verschiedenen Feuchtegehalten und Frequenzen an einer Luzernevariante.

— $f = 10 \text{ kHz}$
 - - - $f = 100 \text{ kHz}$
 - · - · $f = 10 \text{ MHz}$

Die dielektrische Feuchtegehaltsbestimmung auf der Basis der Messung von ϵ' bzw. ϵ'' erfordert demnach u.a. eine genaue Bestimmung bzw. Einhaltung der Meßgutdichte. Bei konstantem Füllvolumen einer entsprechenden Meßeinrichtung erfordert dies zumindest eine exakte Wägung des Kondensatorinhalts. Um die Wirkung dieser Einflußgröße auf die dielektrischen Meßwerte noch besser beurteilen zu können, wurde die Dichte an einer Meßgutvariante in einem weiten Bereich variiert. Hierzu wird in **Bild 11** die Dichteabhängigkeit des Realteils ϵ' für Luzerne mit verschiedenen Feuchtegehalten bei den Frequenzen 10 kHz, 100 kHz und 10 MHz dargestellt (trockenes Meßgut ließ sich in dem Kondensator nicht höher als auf $0,5 \text{ g/cm}^3$ verdichten). Im allgemeinen steigt ϵ' der Theorie entsprechend für verschiedene Feuchtegehalte und Frequenzen mit der Dichte an. Die Abnahme jedoch von ϵ' bei niedrigen Frequenzen für Luzerne mit einem Feuchtegehalt von $U = 0,719$ in diesem Beispiel ist nicht zu erklären, zumal gleiches für noch höhere Feuchtegehalte nicht festgestellt werden konnte. Ein nahezu gleichartiges Verhalten zeigt auch der dielektrische Verlustfaktor ϵ'' als Funktion der Dichte. Dementsprechend sollte man annehmen, daß dann $\tan \delta$ als Verhältnis von ϵ'' und ϵ' nahezu dichteunabhängig ist. Dies trifft insbesondere auch für den Frequenzbereich zwischen etwa 10 und 25 kHz zu. So ändert sich $\tan \delta$ bei einer Dichteveränderung von 1 : 6 bei 10 kHz nur im Verhältnis 1 : 1,25. **Bild 12** zeigt diesen Einfluß für Luzerne bei 25 kHz im Dichtebereich zwischen $\rho = 0,167$ bis $1,0 \text{ g/cm}^3$.

Demnach könnte man die $\tan \delta$ -Werte wegen der geringen Dichteabhängigkeit in diesem Frequenzbereich als Maß für den Feuchtegehalt benutzen, doch steigt die Feuchteabhängigkeit von $\tan \delta$ für Feuchtegehalte $U > 0,4$ bis $0,5$ zumeist nur noch wenig an (**Bild 12**), die Charakteristik ist nicht linear.

Eine Verbesserung der Linearität tritt gemäß **Bild 9** erst bei sehr viel höheren Frequenzen auf (z.B. bei 10 MHz). Da jedoch der Dichteinfluß auf $\tan \delta$ bei steigender Frequenz wieder zunimmt, kann er bei höheren Frequenzen nicht vernachlässigt werden.

3.4 Der Einfluß der Gutzusammensetzung

Die physikalische, jedoch wohl noch mehr die chemische Zusammensetzung des Meßgutes übt einen starken Einfluß auf die dielektrischen Meßwerte aus. In **Bild 13** ist hierzu der Verlauf des Real-

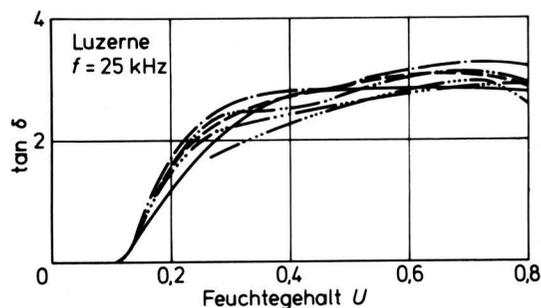


Bild 12. Feuchteabhängigkeit von $\tan \delta$ bei 25 kHz und verschiedenen Dichten an einer Luzernevariante.

— $\rho = 0,166 \text{ g/cm}^3$ - · - · $\rho = 0,332 \text{ g/cm}^3$
 - - - $\rho = 0,200 \text{ g/cm}^3$ · · · $\rho = 0,5 \text{ g/cm}^3$
 - · - · $\rho = 0,250 \text{ g/cm}^3$ · · · $\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$

teils ϵ' und des Verlustfaktors ϵ'' der Dielektrizitätskonstanten von Grünroggen- und Maishäcksel über dem Feuchtegehalt aufgetragen. Es zeigt sich, daß sowohl ϵ' wie auch ϵ'' bei höheren Feuchtegehalten für Grünroggenhäcksel sehr viel höhere Meßwerte als für die Maisvariante erreichen. Hierfür ist wahrscheinlich die unterschiedliche chemische Zusammensetzung dieser Meßgüter verantwortlich. So können z.B. die verschiedenen chemischen Stoffkomponenten die dielektrischen Meßwerte wie folgt beeinflussen:

Proteine vergrößern insbesondere bei sehr feuchtem Gut durch die Anlagerung von Wasser ihre Dipolmomente [10] und führen somit zu einer Erhöhung der Dielektrizitätskonstanten; von zahlreichen Zuckerbausteinen hingegen ist bekannt, daß sie in wässriger Lösung durch ihr negatives (nicht für alle Zuckerarten) dielektrisches Inkrement mit steigender Konzentration zu einer Verringerung der Dielektrizitätskonstanten der Lösung beitragen [15]. Ein erhöhter (Roh-) Faseranteil sollte durch die Polarisationserscheinungen an Grenzflächen und Membranen bei höheren Feuchtegehalten (s. Abschn. 3.1) ebenfalls die dielektrischen Meßwerte ansteigen lassen.

Der Unterschied in den ϵ' - und ϵ'' -Werten in **Bild 13** kann in diesem Fall sehr gut auf die Wirkung der Inhaltsstoffe zurückgeführt werden:

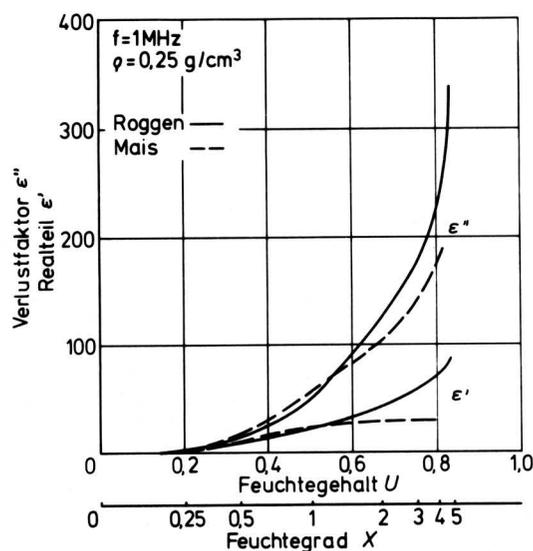


Bild 13. Einfluß der Gutart auf den Realteil ϵ' und den dielektrischen Verlustfaktor ϵ'' in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei 1 MHz.

Die chemischen Analysen des Meßgutes ergaben, daß der Rohproteingehalt des Grünroggens höher, der Gesamtkohlehydratgehalt bzw. der Gehalt an löslichen Kohlehydraten jedoch viel niedriger als der dieser Maisvariante war. Im Rohfasergehalt unterschieden sich beide Meßgüter nicht so stark.

Aus einer für alle Versuchsmaterialien bei bestimmten Frequenzen und Feuchtegehalten zwischen verschiedenen chemischen Komponenten (Inhaltsstoffen) und den dielektrischen Meßwerten durchgeführten Korrelationsanalyse lassen sich folgende Aussagen ableiten: Ein Einfluß von Protein-, Rohfaser- und Kohlehydratgehalt wird erst für Feuchtegehalte $U \geq 0,5$ deutlich. Dann vergrößern sich mit steigendem Proteingehalt Realteil ϵ' und Verlustfaktor ϵ'' , während die $\tan \delta$ -Werte bis zu Frequenzen von 1 MHz sehr stark reduziert werden (negative Korrelation).

Rohfasergehalt und ϵ' bzw. ϵ'' zeigen einen sehr starken positiven Zusammenhang bei hohen Feuchtegehalten, die $\tan \delta$ -Werte werden im Frequenzbereich bis zu 1 MHz bei einer Erhöhung des Rohfasergehaltes ebenfalls vermindert.

Eine starke negative Korrelation ist dagegen zwischen den Werten von Realteil ϵ' und Verlustfaktor ϵ'' und dem Gesamtgehalt an Kohlehydraten bzw. dem Anteil wasserlöslicher Kohlehydrate im gesamten Frequenzbereich zu beobachten, während der entsprechende Zusammenhang mit $\tan \delta$ bis zu Frequenzen von 1 MHz positiv ausfällt.

Im Frequenzbereich zwischen 1 und 10 MHz ändern alle Korrelationen zwischen diesen Inhaltsstoffen und $\tan \delta$ ihr Vorzeichen. Ein Zusammenhang mit dem zweiten Maximum der Frequenzabhängigkeit von $\tan \delta$ (vergl. Bild 6) ist wahrscheinlich, doch sind hierzu derzeit noch keine weiteren Aussagen möglich.

Die Unterschiede in den Absolutwerten des Realteils ϵ' und Verlustfaktors ϵ'' zwischen Mais und Roggen für denselben Feuchtegehalt sind demnach wohl mehr auf die Wirkung der Kohlehydrate als auf die der Proteine zurückzuführen (Bild 13), möglicherweise auch auf den geringfügig höheren Rohfasergehalt des Roggens.

Die starke Abhängigkeit des Realteils ϵ' und des dielektrischen Verlustfaktors ϵ'' von der Gutdichte und von den Inhaltsstoffen macht es nahezu unmöglich, auf dieser Basis ein schnelles Feuchtegehaltsbestimmungsverfahren zu entwickeln.

Der vorangehende Abschnitt zeigte jedoch, daß zumindest aber $\tan \delta$ in einem bestimmten Frequenzbereich nur sehr wenig durch die Materialdichte beeinflusst wird. Dieser Bereich liegt zwischen 10 und 25 kHz. Bild 14 zeigt daher die Feuchteabhängigkeit von

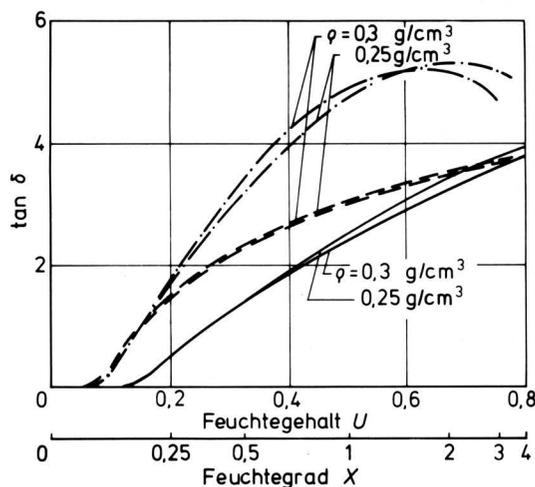


Bild 14. Einfluß von Gutart und -dichte auf die Feuchteabhängigkeit von $\tan \delta$ bei 25 kHz.

— Roggen,
- - - Luzerne,
- · - · - · Mais

$\tan \delta$ bei 25 kHz für zwei verschiedene Gutdichten an verschiedenen Meßgütern. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Regressionsanalyse ist hier jedoch der Einfluß der Meßgutart offenbar besonders hoch, und somit scheidet dieser Frequenzbereich für eine Feuchtegehaltsbestimmung ebenfalls aus, zumal die Feuchtecharakteristik von $\tan \delta$ bei den meisten Gutarten für eine dielektrische Feuchtebestimmung wenig geeignet erscheint.

4. Ein Vorschlag zur dielektrischen Feuchtegehaltsbestimmung

Wahrscheinlich läßt sich jedoch ein Feuchtegehaltsbestimmungsverfahren auf der Basis von $\tan \delta$ für den Frequenzbereich entwickeln, in dem die Korrelationskoeffizienten zwischen $\tan \delta$ und den Inhaltsstoffen absolut gesehen am geringsten sind. Dies ist für alle untersuchten Inhaltsstoffe aufgrund der Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen ca. 2 und 8 MHz der Fall. Bei gleichem Feuchtegehalt und gleicher Dichte weichen hier die $\tan \delta$ -Werte für verschiedene Gutarten am wenigsten voneinander ab. Bild 15 zeigt in diesem Zusammenhang die Streubreiche der Feuchteabhängigkeiten für $\tan \delta$ bei $f = 5$ MHz und der Meßgutdichte $\rho = 0,25 \text{ g/cm}^3$ für verschiedene Gras-, Mais- und Luzernehäckselproben. Die Abhängigkeiten liegen hier dicht beieinander und weisen zumeist auch nahezu linearen Charakter auf. Die noch verbleibenden Abweichungen der $\tan \delta$ -Werte zwischen den verschiedenen Gutproben sind wahrscheinlich verschiedenen Ursprungs: Streuungen in der physikalischen Beschaffenheit (Teilchengröße und -verteilung, Feuchteverteilung usw.) und chemischen Zusammensetzung der Einzelproben, durch Meß- und Ablesefehler, durch den möglichen Einfluß weiterer Inhaltsstoffe, durch die noch nicht optimal gelegte Meßfrequenz in bezug auf den geringsten Einfluß der Inhaltsstoffe und durch Streuungen in der Feuchtegehaltsbestimmung.

Schon für die benachbarten Frequenzen von 2,5 bzw. 10 MHz vergrößern sich die Abweichungen in den $\tan \delta$ -Werten, und die Linearität der Feuchteabhängigkeiten verschlechtert sich wieder; somit scheint die Frequenz von 5 MHz der optimalen Frequenz schon sehr nahe zu sein.

Die Streubreite der $\tan \delta$ -Werte innerhalb einer Gutart ist wesentlich geringer als für sämtliche in Bild 15 dargestellte Meßgutvarianten. Zweckmäßig wird daher ein dielektrisches Meßverfahren für sehr feuchte faserige Stoffe – ähnlich dem für Saatgut und Getreide [1, 7, 10] – auf bestimmte Gutarten getrennt kalibriert.

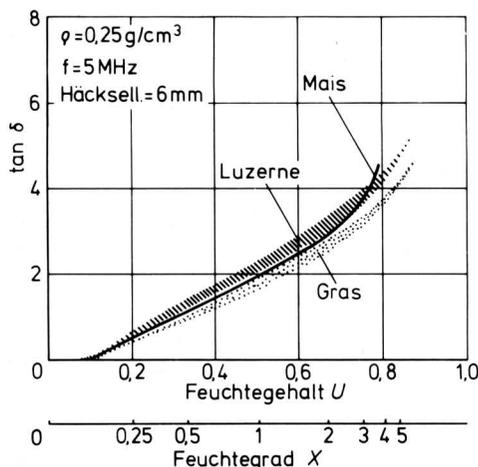


Bild 15. Einfluß der Gutart auf die Feuchteabhängigkeit von $\tan \delta$ bei 5 MHz.

Der Dichteinfluß auf die $\tan \delta$ -Werte ist in diesem Frequenzbereich nicht zu vernachlässigen, ein entsprechendes Meßverfahren kann daher nur bei konstanter Meßguteinwaage in einem konstanten Meßvolumen reproduzierbare Ergebnisse liefern. Da der Einfluß der Teilchengröße auf die Meßwerte in dieser Arbeit nicht untersucht wurde (konstante Häcksellänge ca. 6 mm), sollte bei der weiteren Erprobung und Entwicklung dieses Verfahrens zunächst mit dieser Teilchengröße und der angegebenen Gutdichte gearbeitet werden. Wegen der großen Streuungen in den physikalisch-chemischen Eigenschaften verschiedener Gutproben derselben Gutart ist der Feuchtegehaltswert aus mehreren Messungen zu mitteln.

5. Zusammenfassung

Der Einfluß der physikalischen und chemischen Meßgutbeschaffenheit auf die reelle Komponente ϵ' und den Verlustfaktor ϵ'' der Dielektrizitätskonstanten ist im untersuchten Frequenzbereich (100 Hz–50 MHz) so stark, daß beide Größen als Maß für den Feuchtegehalt sehr feuchter, heterogener Gemische faseriger organischer Stoffe wenig geeignet sind. Es konnte im angegebenen Frequenzbereich durch Regressionsanalysen ein starker Zusammenhang zwischen dem Rohfasergehalt, dem Gehalt an (löslichen) Kohlehydraten sowie dem Proteingehalt einerseits und ϵ' - bzw. ϵ'' -Werten andererseits aufgezeigt werden. Ferner beeinflußt im gesamten Frequenzbereich die Meßgutdichte die beiden Größen sehr stark.

Wesentlich besser für die dielektrische Feuchtegehaltsbestimmung eignet sich dagegen $\tan \delta$ ($= \epsilon''/\epsilon'$), das zwar bei niedrigen Frequenzen (10–25 kHz) die geringste Dichteabhängigkeit aufweist, jedoch dort sehr stark von der chemischen Zusammensetzung beeinflusst wird. Der geringste Einfluß durch die Meßgutbeschaffenheit ist im Frequenzbereich bei etwa 5 MHz zu beobachten; hier ist $\tan \delta$ eine nahezu lineare Funktion des Meßgutfeuchtegehaltes bei nur geringen Abweichungen zwischen den $\tan \delta$ -Werten für verschiedene Gutarten.

Für die weitere Verfahrensentwicklung ist daher bevorzugt dieser Frequenzbereich bei Berücksichtigung des Teilchengrößen- und Dichteinflusses zu empfehlen.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Ahlgrimm, H.-J.*: Verschiedene Möglichkeiten der Feuchtegehaltsbestimmung. *Landbauforschung Völkenrode* Bd. 27 (1977) Nr. 2, S. 97/104.
- [2] *Isaacs, G.W.*: Moisture testers for soils and crops. *Implement & Tractor Farm Implement News* Bd. 74 (1959) Nr. 2, S. 22/24.
- [3] *Stevens, G.N. u. M. Hughes*: Moisture meter performance in field and laboratory. *J. Agric. Engng. Res.* Bd. 11 (1966) Nr. 3, S. 210/17.
- [4] *Zeleny, L.*: Methods for grain moisture measurement. *Agric. Engng.* Bd. 35 (1954) Nr. 4, S. 252/56.
- [5] *Matthews, J.*: The design of an electrical capacitance type moisture meter for agricultural use. *J. Agric. Engng. Res.* Bd. 8 (1963) Nr. 1, S. 17/30.
- [6] *Buchholz, E.*: Über die Eignung bekannter Materialfeuchte-meßverfahren für den Einsatz in landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen. *Deutsche Agrartechnik* Bd. 22 (1972) Nr. 7, S. 317/20.
- [7] *Rietz, S.*: DLG-Maschinenprüfbericht Nr. 2093 (1972), Gruppe 14b/13.
- [8] *Ahlgrimm, H.-J.*: Zur dielektrischen Bestimmung des Feuchtegehaltes von Lebensmitteln. *Zeitschrift für Lebensmitteltechnologie und -verfahrenstechnik* Bd. 28 (1977) Nr. 8, S. 305/11.
- [9] *Kohn, R.M.*: Die Anwendung dielektrischer Meßmethoden in der Lebensmittelanalytik. *Fette-Seifen-Anstreichmittel* Bd. 72 (1970) Nr. 10, S. 895/98.
- [10] *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.
- [11] *Bowman, G.E.*: Persönliche Mitteilung aus dem National Institute of Agricultural Engineering Silsoe.
- [12] *Ko, R.S. u. G.C. Zoerb*: Dielectric constant of wheat straw. *Trans. ASAE* Bd. 13 (1970) Nr. 1, S. 42/45, 47.
- [13] *Schwan, H.P.*: Alternating current spectroscopy of biological substances. *Proc. Institute of Radio Engineers* Bd. 47 (1959) Nr. 11, S. 1841/55.
- [14] *Schwan, H.P.*: Electrical properties of tissue and cell suspensions. In: *Advances in Biological and Medical Physics*, Bd. 5, University of California, Berkeley 1957.
- [15] ● *Hasted, J.B.*: *Aqueous dielectrics*. London: Chapman and Hall 1973.



VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1979

Schriftleitung: Dr. Fr. Schoedder, Braunschweig

Printed in Germany. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil dieser Schriftenreihe darf in irgendeiner Form — durch Photokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren — ohne schriftliche Genehmigung des Verlages, auch nicht auszugsweise, reproduziert werden. — All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this issue may be reproduced in any print, microfilm, or any other means, without written permission from the publishers. — Herstellung: Druckerei Ruth, Braunschweig.