

Ein Beitrag zur dielektrischen Bestimmung des Feuchtegehalts an sehr feuchten organischen Stoffen

Von Heinz-Jürgen Ahlgrimm, Braunschweig*)

Mitteilung aus dem Institut für Landmaschinenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

DK 633.004.12:621.317.33

Zur schnellen Bestimmung des Feuchtegehalts körniger Stoffe, wie z.B. von Getreide, Sämereien usw. werden im relativ trockenen Bereich zum Teil Meßgeräte verwendet, die auf dem Meßprinzip steigender Dielektrizitätskonstanten mit zunehmendem Gutfeuchtegehalt beruhen.

In diesem Beitrag wird versucht, dieses Prinzip auch auf sehr feuchte, heterogen zusammengesetzte organische Stoffe zu übertragen. Nach einer kurzen Einführung in die Theorie der Dielektrika werden erste eigene Ergebnisse, die mit einer geeigneten Versuchsvorrichtung an gehäckseltem Futtergras gewonnen wurden, dargestellt und diskutiert. Hierbei zeigt es sich, daß eine Beantwortung der Frage, ob dieses Verfahren auch zur Messung des Feuchtegehalts an sehr feuchten organischen Haufwerken eingesetzt werden kann, mangels ausreichender Erkenntnisse zur Zeit noch nicht möglich ist.

Inhalt

1. Einleitung
2. Bisher vorliegende Erkenntnisse
3. Das dielektrische Verhalten der Stoffe
 - 3.1 Theorie der Dielektrika
 - 3.2 Einflüsse auf die dielektrische Feuchtegehaltbestimmung
4. Versuchsaufbau und Meßkreisbeschreibung
5. Versuchsdurchführung
6. Diskussion der Meßergebnisse
 - 6.1 Die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Größen
 - 6.2 Die Feuchteabhängigkeit der dielektrischen Größen
7. Schlußfolgerungen
8. Zusammenfassung

*) Dipl.-Phys. H.-J. Ahlgrimm ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

1. Einleitung

Der Feuchtegehalt von Stoffen spielt für zahlreiche Bereiche (Holz-, Papier- und Tabakindustrie, chemische Industrie, Baustoffindustrie und Futtermittelindustrie u.a.) als Gütefaktor für Ausgangs- und Endprodukt eine wichtige Rolle. In einem kontinuierlichen Produktionsprozeß muß daher häufig für eine wirksame Regelung der Feuchtegehalt schnell bestimmt werden können.

In vielen Fällen läßt sich der Feuchtegehalt für Stoffe, die hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und Form weitgehend homogen vorliegen, wie z.B. für Papierblätter, Tabak, Textilgewebe, Zement, aber auch Holz usw. durch verschiedene Verfahren relativ sicher und schnell bestimmen und ein geeigneter Regelvorgang auslösen, zumal deren Feuchtegehalte zumeist gering sind und häufig nur in engen Grenzen schwanken.

Im landwirtschaftlichen Sektor, in dem diese Voraussetzungen für zahlreiche Güter nicht gegeben sind, wäre eine Schnellbestimmungsmethode des Feuchtegehalts ein wesentlicher Faktor im Hinblick auf die Mechanisierung und Automatisierung zahlreicher Produktionsprozesse, auf eine Verbesserung der Produktqualität und auf eine rationelle Energieverwertung [1]. Zudem liegt der Feuchtegehalt zahlreicher landwirtschaftlicher Produkte so hoch, daß hier alle anderweitig für körnige Stoffe mit geringen Feuchtegehalten benutzten Schnellbestimmungsverfahren versagen.

Einem sehr häufig angewendeten Meßprinzip liegt die Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten zugrunde, die sich im Bereich niedriger Materialfeuchtegehalte nahezu linear mit diesem erhöht. Sie ist jedoch auch von einer Reihe weiterer Parameter, wie z.B. von der Materialart und -beschaffenheit, von der geometrischen Form, Dichte, Temperatur und der jeweiligen Meßfrequenz abhängig. Wird mit einem Meßgerät der Feuchtegehalt verschiedener, aber ähnlicher Güter bestimmt, so z.B. für Weizen, Mais und Erbsen, ist für jedes Gut eine eigene Kalibrierung erforderlich. Die Temperatur des Meßgutes wird zumeist konstant gehalten oder ihr Einfluß auf das Anzeigeergebnis im Meßgerät kompensiert [2, 3]. An derselben Gutart liefern diese einfachen für Heu bzw. Getreide verwendeten Feuchtegehaltsmesser, die zum Teil auch die elektrische Leitfähigkeit als Meßgröße benutzen [4], genügend sichere und reproduzierbare Meßergebnisse, wie einschlägige Prüfberichte [2, 4, 5, 6] zeigen.

2. Bisher vorliegende Erkenntnisse

Für die Messung hoher Materialfeuchtegehalte ($\geq 40\% - 50\%$) an Stoffen mit stark ungleichmäßigen Formen und Schichtdicken, wie z.B. Haufwerke aus Gras oder anderen Futterpflanzen, aus Silage, Abfallstoffen u.a., gibt es auf der Basis dielektrischer Größen bisher kein brauchbares, kontinuierlich arbeitendes Meßverfahren für den Feuchtegehalt, obgleich dieses Meßprinzip von allen bisher bekannten Verfahren als am besten geeignet erscheint [1]. Dies war der Anlaß zu Überlegungen und eigenen Arbeiten, die in diesem Beitrag dargestellt werden.

Die Auswertung der zugänglichen Literatur zeigte, daß grundlegende Kenntnisse über das dielektrische Verhalten sehr feuchter, faseriger organischer Haufwerke mit wenigen Ausnahmen [7, 8] noch nicht verfügbar sind; denn im wesentlichen beschränkten sich derartige Messungen bisher auf relativ trockene Getreidekörner, Sämereien und andere körnige Stoffe [9 bis 16] sowie auf Stroh [8].

Die vorliegenden Meßergebnisse überdecken einen weiten Frequenzbereich, so z.B. den Audiofrequenzbereich (bis 20 kHz) [12, 16], den Bereich bis 500 MHz [7, 8, 11, 13, 15] wie auch den Mikrowellenbereich ≥ 1 GHz. Dieser Frequenzbereich, in dem Messungen nur mit einem höheren technischen Aufwand möglich sind [17, 18, 19], erweist sich für die Feuchtegehaltmessung bestimmter homogener Güter offenbar als sehr günstig [10, 17, 20, 21].

Während sich für kleine Frequenzen bei feuchten Stoffen die elektrolytische Leitfähigkeit und andere Einflüsse immer stärker auf das Verhalten der dielektrischen Größen auswirken [20], sinkt mit steigender Frequenz und steigendem Gutfeuchtegehalt im Mikrowellenbereich die Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen [19, 20, 22], und der technische Aufwand zur Durchführung derartiger Messungen nimmt zu.

Für die ersten eigenen Untersuchungen wurde daher der Frequenzbereich zwischen 0,5 und 100 MHz gewählt, in dem derartige Schwierigkeiten zunächst nicht erwartet wurden.

3. Das dielektrische Verhalten der Stoffe

3.1 Theorie der Dielektrika

Die Ursache aller dielektrischen Erscheinungen liegt in der Polarisation der atomaren bzw. molekularen Bausteine der Stoffe begründet:

Unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes werden durch die Kraftwirkung des elektrischen Feldes auf elektrische Ladungen in Atomen durch Verzerrung der Elektronenhülle – Elektronenpolarisation, **Bild 1** bzw. durch Verschiebung von Ladungsschwerpunkten in symmetrisch gebauten (dielektrischen) Molekülen nahezu trägheitslos Dipolmomente induziert. Unter einem Dipol versteht man dabei ein Gebilde [22], das nach **Bild 2** zwei gleich große Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen (Q und $-Q$) trägt, deren Abstand r gegenüber der Felderstreckung klein ist, und das Vektorcharakter zeigt. Dieser Vektor ist definitionsgemäß von der negativen zur positiven Ladung gerichtet. Das Dipolmoment μ ergibt sich dabei aus

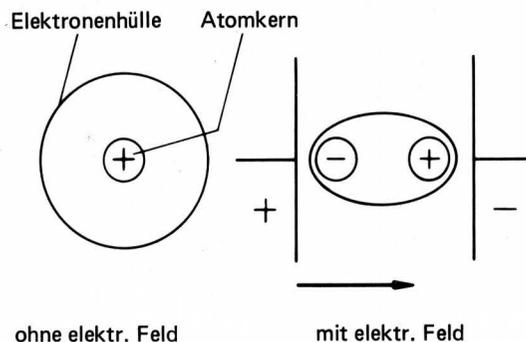


Bild 1. Elektronenpolarisation (schematisch).

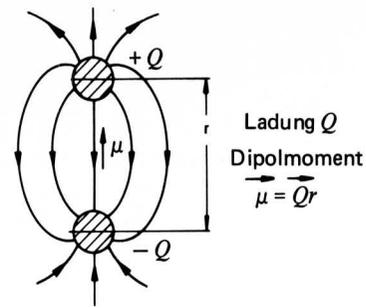


Bild 2. Schematische Darstellung eines Dipols.

$$\vec{\mu} = Q \vec{r} \quad (1)$$

und liegt in der Größenordnung von 10^{-30} Cm.

In Molekülen, die durch ihren unsymmetrischen Aufbau schon eine Trennung der Ladungsschwerpunkte aufweisen (polare Stoffe), kann durch die Vergrößerung des Abstandes der Ladungen im elektrischen Feld wiederum nahezu trägheitslos ein zusätzliches Dipolmoment induziert werden – atomare Polarisation, **Bild 3**.

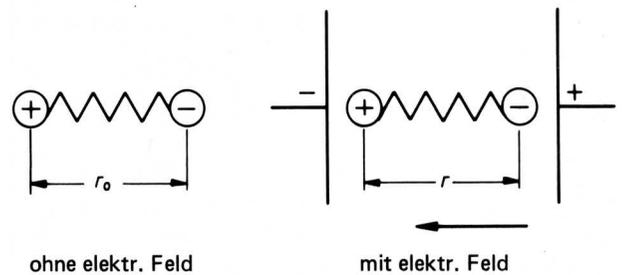


Bild 3. Atomare Polarisation (schematisch).

Solche polaren Moleküle, deren Dipolrichtungen sich normalerweise statistisch auf alle Raumrichtungen gleichmäßig verteilen, so daß der betreffende Stoff nach außen hin elektrisch neutral erscheint, werden durch ein elektrisches Feld je nach Feldstärke E mehr oder weniger gut ausgerichtet. Diese Orientierungspolarisation, **Bild 4**, ist der für das dielektrische Verhalten eines Stoffes entscheidende Faktor.

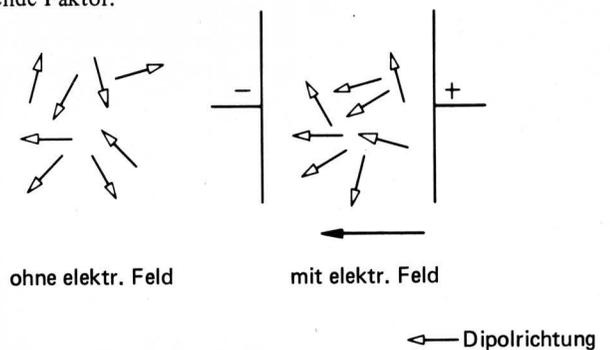


Bild 4. Orientierungspolarisation (schematisch).

Das bei der Feldstärke E nach außen hin wirkende Dipolmoment μ_W eines Moleküls beträgt bei Berücksichtigung von Elektronen-, Atom- und Orientierungspolarisation

$$\vec{\mu}_W = (a_e + a_a + \frac{\mu^2}{3kT}) \vec{E} \quad (2)$$

wobei die Koeffizienten a_e , a_a und $\mu^2/3kT$ die Polarisierbarkeiten (Dipolmoment/Feldstärkeeinheit) in der oben genannten Reihenfolge angeben. Hier ist T die absolute Temperatur und k die Boltzmann-Konstante ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

Der Klammerausdruck in Gl. (2) kann zu einer Gesamtpolarisierbarkeit a_g zusammengefaßt werden. Wird ferner in stark verdichteten Gasen, in Flüssigkeiten und Festkörpern der nicht mehr zu vernachlässigende Einfluß von Nachbarmolekülen auf einen Dipol berücksichtigt, so erhält man für ein Mol eines Stoffes mit der Molmasse M , Dichte ρ und N_L Molekülen (Loschmidt-Konstante $N_L = 6,023 \cdot 10^{23}$ Moleküle/Mol) nach *Clausius – Mosotti* die molare Polarisierbarkeit:

$$a_g = M \cdot \frac{3 \epsilon_0}{\rho N_L} \cdot \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \quad (3a)$$

Hierin ist ϵ_0 die absolute, auf Vakuum bezogene Dielektrizitätskonstante ($\epsilon_0 = 8,855$ pF/m) und ϵ die relative Dielektrizitätskonstante eines Stoffes. Diese Beziehung stellt einen Zusammenhang zwischen den molekularen Eigenschaften und der makroskopisch meßbaren Größe ϵ des Stoffes dar. Da jedoch die Orientierung der Moleküle mit einer Relaxationszeit τ verbunden ist, nehmen sowohl die molare Polarisierbarkeit a_g wie auch ϵ komplexen Charakter an, sie werden frequenzabhängig:

$$a_g^* = M \cdot \frac{3 \epsilon_0}{\rho N_L} \cdot \frac{\epsilon^* - 1}{\epsilon^* + 2} = (a_e + a_a + \frac{\mu^2}{3kT} \cdot \frac{1}{1 + j\omega\tau}) \quad (3b)$$

Hierin ist das Zeichen * Symbol für die Darstellung komplexer Größen, $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$ und f die Frequenz des elektrischen Wechselfeldes.

Die Relaxation (Verzögerung) der Dipolorientierung läßt sich wie folgt erklären:

Der Orientierung der Moleküle (durch Rotation) wirkt der Reibungswiderstand durch die Viskosität η des sie umgebenden Mediums entgegen und verzögert die Gleichgewichtseinstellung der Moleküle in Richtung des elektrischen Feldes beim Einschalten bzw. Ausschalten oder bei einer Richtungsänderung des Feldes um die Zeit τ . Diese Relaxationszeit kann mit der Annahme eines kugelförmigen Moleküls mit dem Radius r zu

$$\tau = \frac{4\pi r^3 \eta}{kT} \quad (4)$$

abgeschätzt oder aus dielektrischen Messungen bestimmt werden.

Mit dem komplexen Ansatz

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (5)$$

kann man für sehr kleine Frequenzen ($\omega \rightarrow 0$) und sehr große Frequenzen ($\omega \rightarrow \infty$) aus Gl. (3b) die Frequenzabhängigkeit des reellen (kapazitiven) Anteils ϵ' und des komplexen Anteils ϵ'' bestimmen (*Debye – Drude*-Gleichungen):

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{(1 + \omega^2 \tau^2 x^2)} \quad (6a)$$

$$\epsilon'' = \frac{\omega \tau x (\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{(1 + \omega^2 \tau^2 x^2)} \quad (6b)$$

und

$$x = \frac{\epsilon_s + 2}{\epsilon_\infty + 2} \quad (6c)$$

Darin ist ϵ_s der statische Anteil (für $\omega \rightarrow 0$) und ϵ_∞ der für sehr hohe Frequenzen jenseits der Relaxation verbleibende, in der Regel die optischen Eigenschaften eines Stoffes charakterisierende Anteil der relativen Dielektrizitätskonstanten infolge induzierter Elektronen- und atomarer Polarisation.

Die Größe ϵ' wird auch als kapazitiver Anteil oder Realteil [20] der relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ^* bezeichnet, während ϵ'' die

Höhe der dielektrischen Verluste durch Ladungstransport und Stoßprozesse bei der Molekülrotation und -translation (Erwärmung!) angibt (Verlustfaktor) und entsprechend Gl. (7)

$$\sigma = \epsilon_0 \epsilon'' \omega \quad (7)$$

zu einer dielektrischen Leitfähigkeit führt. Diese wächst insbesondere dann an, wenn die Dipolorientierung infolge der Relaxation den schnellen Feldwechseln nicht mehr zu folgen vermag. Der Verlustfaktor ist für die Effektivität der Erwärmung, so z.B. für die Trocknung von landwirtschaftlichen Gütern in hochfrequenten elektrischen Feldern maßgebend [23, 24].

Das häufig benutzte Verhältnis von ϵ'' zu ϵ' wird mit

$$\tan \delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (8)$$

als Verlusttangens bzw. δ als Verlustwinkel bezeichnet. Trägt man für ein ideales Dielektrikum die Werte für ϵ' , ϵ'' , $\tan \delta$ und σ über dem Produkt von ω und τ auf, so zeigt sich das in **Bild 5** dargestellte Verhalten. Der Frequenzbereich, in dem ϵ' infolge der Relaxation stark abfällt und ϵ'' ein Maximum durchläuft, wird Dispersionsbereich genannt, weil hier alle dielektrischen Größen eine starke Frequenzabhängigkeit zeigen. Dieser Dispersionsbereich ist sehr breit, da es sich hierbei um einen Verzögerungsprozess mit exponentiellem Charakter und nicht um einen relativ scharf begrenzten Resonanzvorgang handelt.

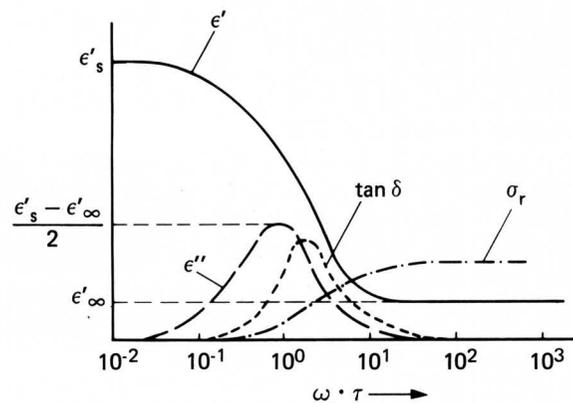


Bild 5. Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Größen (schematisch).

3.2 Einflüsse auf die dielektrische Feuchtegehaltbestimmung

Reines Wasser, dessen Gehalt in organischen Stoffen dielektrisch bestimmt werden soll, ist ein nahezu ideales Dielektrikum mit einem Dipolmoment $\mu = 6,13 \cdot 10^{-30}$ Cm, einer Relaxationszeit $\tau = 0,93 \cdot 10^{-11}$ s, einem statischen Wert der relativen Dielektrizitätskonstanten $\epsilon_s = 80,3$ und $\epsilon_\infty = 4,2$ bei 20 °C.

Der statische Wert ϵ_s bleibt bis zu einer Frequenz von $f = 100$ MHz unverändert und fällt erst bei Frequenzen ≥ 1 GHz ($= 10^9$ Hz) stärker ab. Das Maximum von ϵ'' mit $35 \div 40$ liegt bei 20 °C zwischen 10 und 20 GHz entsprechend einer Wellenlänge λ zwischen 3 und 1,5 cm [20].

Bei der dielektrischen Feuchtegehaltmessung geht man davon aus, daß bei relativ konstanten, kleinen ϵ_s -Werten der Trockensubstanz die relative Dielektrizitätskonstante der Mischung Luft – Trockensubstanz – Wasser proportional mit dem Feuchtegehalt steigt. Diese Proportionalität bleibt vermutlich aber nur so lange gewahrt, wie das Meßgut aus annähernd gleichartigen Teilchen (entsprechend einer gleichbleibenden Gutdichte) besteht, so daß der Porenraum zwischen den Teilchen nahezu unverändert bleibt.

Wenn sich der Porenraum bei sehr feuchten Stoffen mehr und mehr mit Wasser füllt, so tritt höchstwahrscheinlich wegen der durch das Porenwasser sehr viel stärker wirkenden kapazitiven Kopplung der

Geteilchen untereinander ein progressiver, überproportionaler Anstieg der Dielektrizitätskonstanten der Mischung ein. Daher ist anzunehmen, daß Teilchenform und -größe wie auch die Größenverteilung der Teilchen infolge des unterschiedlichen Porenraumes und damit auch die Dichte der Mischung neben dem Wassergehalt und dem Füllgrad des Porenraumes mit Wasser die Meßwerte beeinflussen. Ein Dichteinfluß kann auch aus dem Verhältnis M/ρ in den Gln. (3a) und (3b) abgeleitet werden.

Ein weiterer Einfluß ist durch die Temperaturabhängigkeit der Orientierungspolarisation (proportional $1/T$) gegeben.

In organischen Stoffen befindet sich eine Vielzahl von Molekülen, Molekülgruppen und Bausteinen, die ebenfalls polaren Charakter zeigen und eigene, von ihrer Größe abhängige Relaxationszeiten τ aufweisen sowie aufgrund ihrer teilweise hohen Dipolmomente sehr stark zu ϵ' beitragen können. Hierzu gehören die Aminosäuren ($\mu \geq 33,3 \cdot 10^{-30}$ Cm), aber noch viel mehr die größeren, aus zahlreichen Aminosäuren aufgebauten Proteinmoleküle ($\mu \approx 600 \div 1332 \cdot 10^{-30}$ Cm), deren Relaxationen im Frequenzbereich zwischen 100 kHz bis 10 MHz liegen [20]. Hierauf sind die hohen Werte von ϵ' für eiweißhaltige, tierische Gewebe – teilweise $\epsilon' > 200$ bei 25 MHz [20] – zurückzuführen. Bei pflanzlichen Proteinen ist mit ähnlichen Werten zu rechnen.

Andere Stoffe, wie z.B. Zucker und zuckerähnliche Stoffe ($\mu \approx 13,3 \div 16,7 \cdot 10^{-30}$ Cm), Fett usw., tragen vermutlich auch, doch wohl nicht in dem Maße wie Proteine zu ϵ' bei. Zahlreiche Molekülgruppen in den Proteinen, Aminosäuren und in anderen Substanzen können auch eigene Relaxationen zeigen, sofern sie relativ frei beweglich sind. Hierdurch kann ein recht kompliziertes Relaxationsspektrum eines Stoffes entstehen. Weitaus verwickelter werden die Vorgänge durch die zusätzliche Wechselwirkung der organischen Substanz mit Wasser:

Gebundenes Wasser kann dielektrisch nicht mehr quantitativ nachgewiesen werden, da sich neben der Relaxationszeit auch sein dielektrisches Verhalten völlig verändert [20]. Schon Oberflächen- bzw. Kapillarwasser zeigt ein von freiem Wasser sehr stark abweichendes Verhalten [20].

Durch die Wasserbindung an bestimmte Moleküle, Molekülgruppen oder Bausteine der organischen Substanz können sich deren dielektrische Eigenschaften ebenfalls stark verändern.

Hydrathüllen um Moleküle, im besonderen aber auch in kolloidalen Lösungen suspendierte, von elektrischen Doppelschichten umgebene Teilchen können zu sehr hohen Dielektrizitätskonstanten (≈ 1000) solcher Lösungen führen [20]. Einen weiteren Beitrag hierzu können elektrisch leitende Doppelschichten an Zellmembranen und an ähnlichen Bestandteilen organischer Stoffe liefern.

Schließlich kann eine elektrolytische Leitung infolge dissoziierter anorganischer Salze zu einem erheblichen Anstieg des Verlustfaktors ϵ'' und von $\tan \delta$ führen und die Messung von ϵ' , ganz besonders im Bereich tieferer Frequenzen, beeinträchtigen. Deshalb wird man Messungen in einem statischen elektrischen Feld ($f = 0$) ausschließen.

Durch die Wirkung dieser, wie auch weiterer, hier nicht angeführter Effekte wird man bei der Untersuchung des dielektrischen Verhaltens feuchter, organischer Stoffgemische mit erheblichen Abweichungen im Frequenzverhalten wie wohl auch in den Absolutwerten gegenüber idealen Dielektrika nach Bild 5 rechnen müssen.

Bei einem vorgegebenen, realen feuchten Ausgangsmaterial sind zwar durch die Wahl konstanter Temperaturen und Dichten die ersten beiden Einflüsse auszuschalten, aber schon der Einfluß unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung wie auch der aller anderen Faktoren läßt sich nicht einmal annähernd voraussehen oder abschätzen.

In den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurde als Grundlage für die dielektrische Feuchtegehaltbestimmung versucht, bei annähernd konstanter Temperatur erste Aussagen über den Feuchte- und Dichteinfluß auf das Verhalten der dielektrischen Größen von gehäckseltem Futtergras zu erhalten.

4. Versuchsaufbau und Meßkreisbeschreibung

Für die Messung der dielektrischen Größen wurde ein geeigneter Meßkondensator konstruiert, Bild 6, dessen Gehäuse und Meßelektroden aus Messing bestehen. Kernstück ist der eigentliche Meßbehälter g aus Teflon mit einem Durchmesser von 133 mm, dessen untere kreisförmige Grundfläche e als Meßelektrode dient. Diese ruht auf der durch drei Teflonstützen i isoliert vom Gehäuse a angebrachten Grundplatte f . Über einen Spindeltrieb b kann durch Heben und Senken der oberen Elektrode d , die über Kupferbänder k elektrischen Kontakt mit dem Kondensatorgehäuse a besitzt, der Meßraum verändert werden, wobei eine Rotation dieser Elektrode durch zwei Führungsbolzen c verhindert wird. Meßkopfadapter h und Thermoelement j werden zur Messung der dielektrischen Größen und der Temperatur des Meßgutes l benutzt.

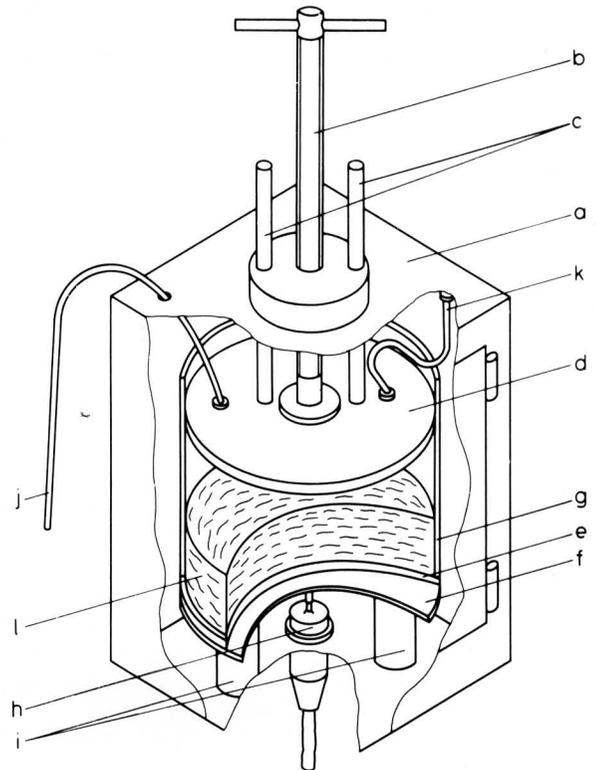


Bild 6. Schnittbild des Meßkondensators.

a Gehäuse	g Meßbehälter
b Spindeltrieb	h Meßkopfadapter
c Führungsbolzen	i Teflonstützen
d Obere Elektrode	j Thermoelement
e Untere Elektrode	k Kupferbänder
f Grundplatte	l Meßgut

Mit einem selbstabgleichenden Vektor-Impedanzmeter, das einen Signalgenerator enthält und sich besonders zur Messung hoher Verlustfaktoren eignet, wurden die Impedanz Z (komplexer Widerstand) und der Phasenwinkel φ im Frequenzbereich $f = 0,5 \div 100$ MHz ermittelt, während die Temperatur thermoelektrisch mit einem Digitalvoltmeter bestimmt wurde. Bild 7 zeigt den Versuchsaufbau während der Messungen.

Das physikalische Ersatzschaltbild dieser Meßanordnung wird durch Bild 8 dargestellt: Hierin bedeutet $U_S = U_0 \sin \omega t$ die sinusförmige Wechselspannung der Signalquelle, die mit der Meßkopfinduktivität L und der Meßkondensatorkapazität C in Reihe geschaltet ist. Der dem Kondensator parallel geschaltete Widerstand R symbolisiert den endlichen Widerstand des Meßgutes infolge dielektrischer und elektrolytischer Verluste. Der Strom I_S aus der Signalquelle, der zunächst die Induktivität L durchfließt, verzweigt sich in einen kapazitiven Blindstrom I_C und einen Wirkstrom I_R .

Zwischen der Signalspannung U_S und dem Strom I_S bildet sich infolge der phasenverschiebenden Wirkung der induktiven und kapazitiven Elemente L und C des Meßkreises der Phasenwinkel φ aus:

$$\varphi = \arctan \frac{\omega[L(1 + \omega^2 C^2 R^2) - CR^2]}{R} \quad (9)$$

Die Impedanz Z des Meßkreises ergibt sich zu:

$$|Z| = \frac{[R^2 + \omega^2(L(1 + \omega^2 C^2 R^2) - CR^2)^2]^{1/2}}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \quad (10)$$

Aus den gemessenen Werten für die Impedanz Z und den Phasenwinkel φ können für dieselben Frequenzen $f = \omega/2\pi$ der Widerstand R und die Kapazität C des mit Meßgut gefüllten Kondensators errechnet werden, sofern zuvor die konstante Meßkopfinduktivität L im Kurzschlußversuch ($R = 0$) aus der Messung von Z bestimmt wurde. Zur Berechnung von ϵ' muß weiterhin gemäß

$$\epsilon' = \frac{C - C_S}{C_0} \quad (11)$$

die theoretische Leerlaufkapazität (Kapazität des leeren Kondensatorvolumens) C_0 wie auch die Streukapazität C_S bekannt sein. Während C_0 aus der Plattenfläche A und deren Abstand h nach

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{h} \quad (12)$$

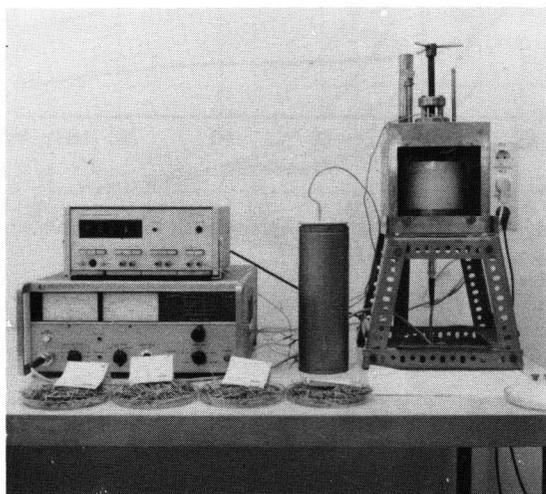


Bild 7. Meßplatz für die dielektrische Feuchtegehaltbestimmung.

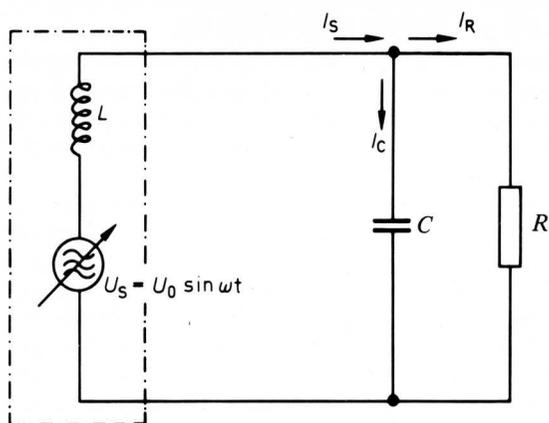


Bild 8. Ersatzschaltbild des Meßkreises.

ermittelt wird, kann C_S bei Kenntnis von C_0 durch die Messung der Kapazität des leeren Kondensator ($R \rightarrow \infty$) C_L errechnet werden, wobei C_L die Summe von C_S und C_0 ergeben muß.

Aus dem Widerstand R läßt sich mit Hilfe der Leitfähigkeit σ nach Gl. (7) der dielektrische Verlustfaktor ϵ'' aus

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{h}{A} = \frac{h}{\epsilon_0 \epsilon'' \omega A} = \frac{1}{C_0 \epsilon'' \omega} \quad (13)$$

zu

$$\epsilon'' = \frac{1}{R C_0 \omega} \quad (14)$$

bestimmen.

Der Verlusttangens $\tan \delta$ ergibt sich als Verhältnis von ϵ'' und ϵ' entsprechend Gl. (8) und die komplexe relative Dielektrizitätskonstante ϵ^* zu

$$\epsilon^* = (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2} \quad (15)$$

5. Versuchsdurchführung

Für die Messung wurde sehr junges Welsches Weidelgras auf $5 \div 10$ mm Länge gehäckselt und zu 5 Proben von je 0,06 kg Ausgangsmasse für die ersten Messungen eingewogen. Durch die gleichzeitigen Untersuchungen an 5 Parallelproben sollten Meßwertstreuungen — durch die Ungleichmäßigkeiten in der Probenahme bzw. in der Probenzusammensetzung bedingt — ausgeglichen werden. Solche Streuungen führten jedoch nur zu Streuungen der Größen ϵ' , ϵ'' , ϵ^* und $\tan \delta$ von weit weniger als 10 %.

Die Untersuchungen wurden jeweils bei 11 verschiedenen festen Frequenzen im Bereich zwischen $0,5 \div 100$ MHz an den 5 Proben bei 3 verschiedenen Dichten von $\rho = 300, 350$ und 400 kg/m^3 vorgenommen, um auch die Dichteabhängigkeit der Meßwerte in einem engen Dichtebereich kennenzulernen. Der jeweilig vor Versuchsbeginn einzustellende Elektrodenabstand h wird aus der Probenmasse, der Meßbehältergrundfläche A und der einzustellenden Dichte ρ errechnet.

Zur Ermittlung der Feuchteabhängigkeit der dielektrischen Größen wurden diese Proben im Meßraum bei einer Temperatur von $24 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ bis zur nächsten Messung bei offener Lagerung getrocknet und vor jeder neuen Messung erneut gewogen. Sämtliche Meßwerte wurden zur weiteren Ermittlung der Größen ϵ' , ϵ'' , $\tan \delta$ und ϵ^* über die vorher abgeleiteten Beziehungen Gln. (11), (14), (8) und (15) mit einer EDV-Anlage ausgewertet.

6. Diskussion der Meßergebnisse

6.1 Die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Größen

Bei der Darstellung der Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Größen in Bild 9 bis 11 wurden nur die Meßwerte einer Probe aufgenommen; die entsprechenden Abhängigkeiten der übrigen Proben sind bei geringen Streuungen in den Zahlenwerten im Verlauf ähnlich. Obgleich ϵ' , ϵ'' und ϵ^* für die höchsten Gutfeuchtegehalte und -dichten an der unteren Frequenzgrenze z.T. Werte von mehr als 300 erreichten, wurden die Ordinatenwerte auf 100 begrenzt, um die Übersichtlichkeit in den Darstellungen zu erhöhen.

Bild 9 zeigt zunächst die Frequenzabhängigkeit von ϵ' für verschiedene Gutfeuchtegehalte bei einer Dichte $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$. Für die kleinste Frequenz von 0,5 MHz wurde für ϵ' ein Wert von 250 ermittelt. Die außerordentlich hohen Meßwerte für hohe Gutfeuchtegehalte und kleine Frequenzen wie auch der starke Abfall bei höheren Frequenzen sind mit der Theorie für ideale Dielektrika nicht zu erklären; hiernach wären in diesem Frequenzbereich frequenzunabhängige, konstante Meßwerte von höchstens 80, dem Wert von reinem Wasser, zu erwarten.

Das scheinbare Absinken von ϵ' an der unteren Frequenzgrenze mit fallendem Gutfeuchtegehalt muß keinesfalls eine Abnahme von ϵ' bedeuten, sondern kann auch auf eine Verschiebung des Dispersionsbereiches in Richtung kleinerer, in den Messungen nicht mehr erfaßter Frequenzen zurückzuführen sein.

Einer solchen Verschiebung würde auch die Verkleinerung von ϵ'' an der unteren Frequenzgrenze mit fallendem Gutfeuchtegehalt und der Dichte von $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$ gemäß Bild 10 entsprechen. Für den höchsten Gutfeuchtegehalt erreicht der Verlustfaktor ϵ'' bei 0,5 MHz etwa den Wert 300. Derart hohe Werte sind nach der Theorie idealer Dielektrika für Wasser als Dielektrikum in diesem Frequenzbereich wie auch in dieser Höhe nicht zu erwarten, sie deuten auf komplizierte Wechselwirkungsprozesse hin.

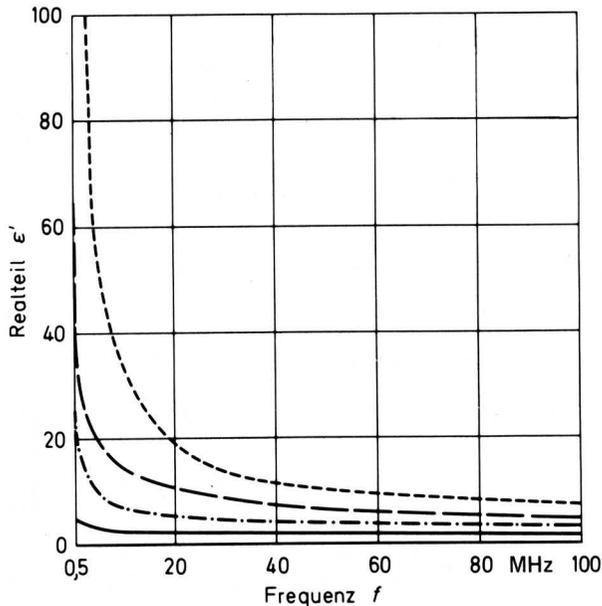


Bild 9. Realteil ϵ' in Abhängigkeit von der Frequenz.

Welsches Weidelgras $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$
 — U = 25 % - - - U = 70 %
 - · - U = 43 % - - - - U = 86 %

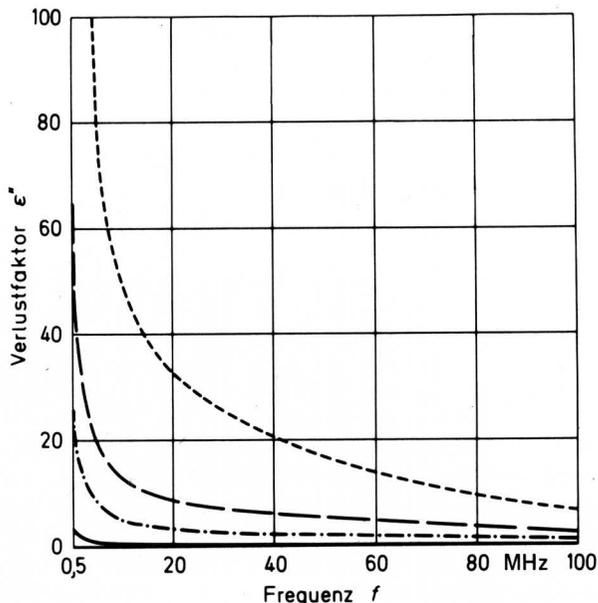


Bild 10. Verlustfaktor ϵ'' in Abhängigkeit von der Frequenz.

Welsches Weidelgras $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$
 — U = 25 % - - - U = 70 %
 - · - U = 43 % - - - - U = 86 %

Eine Darstellung der Frequenzabhängigkeit für die aus ϵ' und ϵ'' zusammengesetzte, komplexe relative Dielektrizitätskonstante ϵ^* bringt gegenüber den Bildern 9 und 10 nichts grundsätzlich Neues.

Die Bestätigung für die Frequenzverschiebung des Dispersionsbereiches von ϵ' und des Maximums von ϵ'' mit sinkendem Gutfeuchtegehalt kann auch aus der Auftragung von $\tan \delta$ über der Meßfrequenz bei verschiedenen Gutfeuchtegehalten abgeleitet werden, Bild 11: Für den höchsten Feuchtegehalt wird für $\tan \delta$ ein Maximum bei 15 MHz beobachtet, das für die beiden anderen untersuchten, hier nicht dargestellten Gutdichten bei derselben Frequenz liegt. Es verschiebt sich offenbar ebenfalls mit sinkendem Feuchtegehalt in Richtung kleinerer Frequenzen.

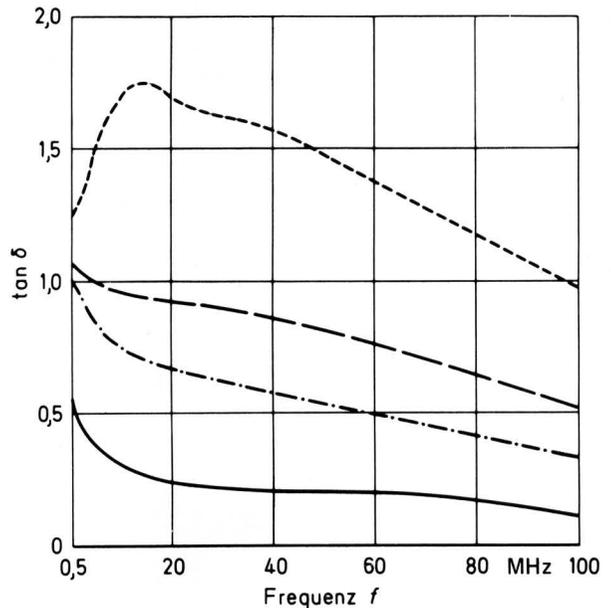


Bild 11. Verlusttangens $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Frequenz.

Welsches Weidelgras $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$
 — U = 25 % - - - U = 70 %
 - · - U = 43 % - - - - U = 86 %

Da auch für ideale Dielektrika gemäß Bild 5 das Maximum für $\tan \delta$ gegenüber dem von ϵ'' bei höheren Frequenzen liegt, kann mit großer Sicherheit aus Bild 11 auch auf die Existenz eines Maximums für den Verlustfaktor ϵ'' , Bild 10, unterhalb von 0,5 MHz geschlossen werden.

Eine Frequenzverschiebung des Maximums von ϵ'' und $\tan \delta$ mit sinkendem Feuchtegehalt finden auch *Stetson* und *Nelson* [16] an Weizenkörnern, Sojabohnen und Grassaat im Frequenzbereich $0,25 \div 20 \text{ kHz}$ für kleine Gutfeuchtehalte.

Für die Höhe der ϵ' -Werte und die Frequenzverschiebung gibt es zur Zeit noch keine gesicherte Erklärung: Die hohen ϵ' -Werte lassen sich möglicherweise durch die Polarisation von Doppelschichten um suspendierte Teilchen und Zellen bzw. durch Hydrathüllen um Proteinmoleküle erklären.

Die Frequenzverschiebung ließe sich durch den *Maxwell-Wagner-Effekt* deuten, wonach für elektrisch leitende Teilchen in einem verlustlosen Medium eine Relaxation auftritt, die in diesem Frequenzbereich liegen kann [20]. Als derartige Teilchen werden Proteinmoleküle in wäßriger Lösung angesehen. Mit abnehmender Leitfähigkeit würde sich die Relaxationszeit vergrößern, der Relaxationsprozeß also in den Bereich tieferer Frequenzen fallen.

Der Anstieg der Relaxationszeit könnte aber auch auf die Vergrößerung der Reibung der sich orientierenden Moleküle mit dem sie umgebenden Medium mit abnehmendem Gutfeuchtegehalt (steigende Viskosität η) zurückgeführt werden. Allerdings werden siche-

re Aussagen über die wirklichen Ursachen erst dann möglich sein, wenn durch ergänzende Messungen unterhalb der Frequenzgrenze von 0,5 MHz das Verhalten der dielektrischen Größen in diesem Frequenzbereich besser bekannt ist.

6.2 Die Feuchteabhängigkeit der dielektrischen Größen

In den Diagrammen über die Feuchteabhängigkeit, Bild 12 und 13, die durch die Mittelwertbildung der Meßwerte aller Proben gewonnen wurden, sind für eine übersichtliche Darstellung der Abhängigkeiten die Ordinatenwerte von ϵ' und ϵ'' für die Frequenz von 1 MHz wiederum auf den Wert 100 begrenzt. Es wurden bei dieser Frequenz für ϵ' bzw. ϵ'' bei der höchsten Dichte $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ Werte von $200 \div 230$ bzw. $240 \div 280$ bei einem Feuchtegehalt von 86 % ermittelt.

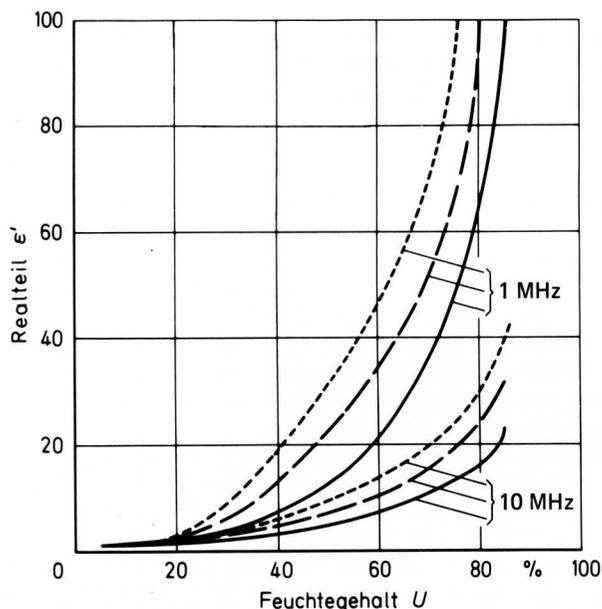


Bild 12. Realteil ϵ' als Funktion des Feuchtegehalts für zwei verschiedene Frequenzen.

Welsches Weidelgras
 — $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$
 - - $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$
 ---- $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$

Aus Bild 12, in dem ϵ' für zwei Frequenzen und die drei untersuchten Dichten aufgetragen ist, geht für die Frequenz von 10 MHz ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen ϵ' und dem Feuchtegehalt bis etwa $60 \div 70 \%$ hervor, der weiter verbessert werden kann, wenn eine größere Frequenz gewählt wird. Mit steigender Frequenz sinkt jedoch die Auflösung und somit auch die Meßgenauigkeit eines möglichen Meßverfahrens für den Feuchtegehalt wegen der Verkleinerung der ϵ' -Werte.

Oberhalb eines Feuchtegehalts von $70 \div 75 \%$ steigt der Wert von ϵ' überproportional an. Dies kann auf die mit steigendem Feuchtegehalt zunehmende Ausfüllung des Porenraumes mit Flüssigkeit zurückgeführt werden, wodurch die Gutteilchen über Flüssigkeitsbrücken viel stärker miteinander gekoppelt werden als durch luftgefüllte Porenräume.

Mit steigender Gutdichte nimmt ϵ' ebenfalls zu, was aufgrund der Gln. (3a) und (3b) bereits zu erwarten war. Die höhere Verdichtung bewirkt auch über eine Verkleinerung des Luftporenraumes im Meßgut den Anstieg von ϵ' . Der Dichteinfluß wirkt sich bei niederen Gutfeuchtegehalten weit weniger stark auf ϵ' und ϵ'' aus, Bild 13, als bei höheren Feuchtegehalten. Es ist demnach bei der Feuchtegehaltbestimmung von Meßgut mit gleichartiger Beschaffenheit der Gutteilchen im Bereich geringer Feuchtegehalte eine Dichtebestimmung vermutlich nicht notwendig.

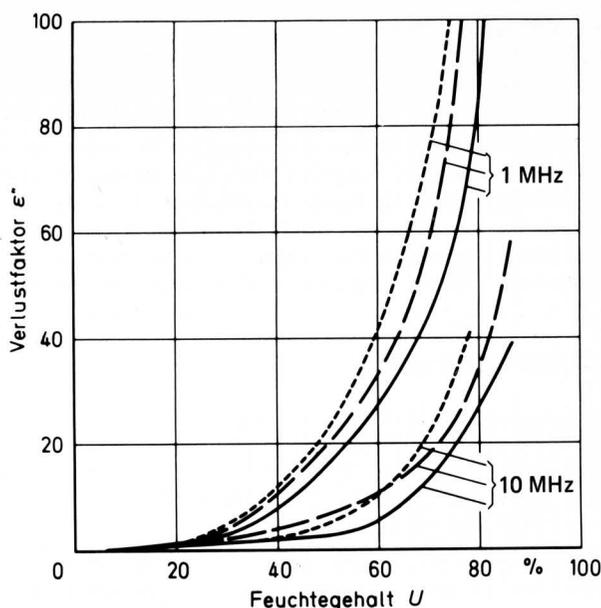


Bild 13. Verlustfaktor ϵ'' als Funktion des Feuchtegehalts für zwei verschiedene Frequenzen.

Welsches Weidelgras
 — $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$
 - - $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$
 ---- $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$

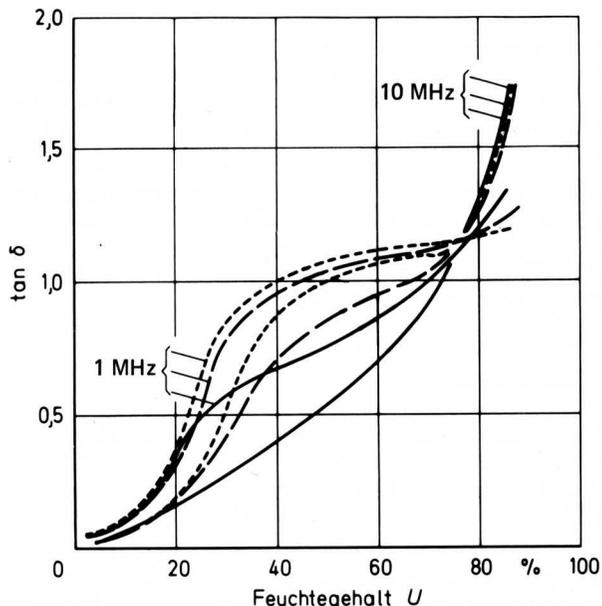


Bild 14. Verlusttangens $\tan \delta$ als Funktion des Feuchtegehalts für zwei verschiedene Frequenzen.

Welsches Weidelgras
 — $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$
 - - $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$
 ---- $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$

Die Feuchteabhängigkeit des dielektrischen Verlustfaktors ϵ'' in Bild 13 gleicht der von ϵ' . Es fällt auch hier die starke Dichteabhängigkeit im Bereich mittlerer und höherer Gutfeuchtegehalten wie auch der überproportionale Anstieg von ϵ'' im sehr feuchten Bereich auf.

Mit steigender Gutdichte nehmen die Werte für $\tan \delta$ ebenfalls zu, der in Abhängigkeit von der Feuchte für die Frequenzen von 1 und 10 MHz und für die drei verschiedenen Dichten in Bild 14 dargestellt ist. Dabei ändert sich auch die Charakteristik der Abhängigkeiten, besonders im Bereich mittlerer Gutfeuchtegehalten.

Aus der Dichteabhängigkeit von $\tan \delta$, wie auch wegen der uneinheitlichen Abhängigkeiten von der Feuchte (dies konnte bereits in früheren Untersuchungen festgestellt werden), ist zu folgern, daß der $\tan \delta$ als Größe zur Bestimmung des Feuchtegehalts ausscheidet.

Es könnte jedoch die Frequenzverschiebung des Maximums von $\tan \delta$ mit sinkendem Feuchtegehalt, Bild 11, die diesen ersten Messungen zufolge von der Gutdichte unabhängig ist, als ein Maß für den Feuchtegehalt organischer Stoffe dienen. Eine solche Abhängigkeit muß aber zunächst durch ergänzende Untersuchungen unterhalb von 0,5 MHz an verschiedenen Stoffen nachgewiesen werden.

7. Schlußfolgerungen

Eine abschließende Beurteilung, ob die Entwicklung eines Verfahrens zur Feuchtegehaltbestimmung für sehr feuchte, heterogen zusammengesetzte organische Stoffe auf der Basis ihres dielektrischen Verhaltens möglich ist, kann aufgrund dieser ersten Messungen noch nicht gegeben werden.

Hierzu müssen weitere Stoffe untersucht und der Einfluß unterschiedlicher Stoffarten und -zusammensetzungen einbezogen werden, da es sich in ersten orientierenden Untersuchungen zeigte, daß auch erhebliche Unterschiede quantitativer Art zwischen Proben der gleichen Grasart bestehen, die zu verschiedenen Zeitpunkten eines Jahres oder in verschiedenen Jahren geerntet werden.

Weiterhin ist durch die Erweiterung des Frequenzbereiches – vor allem in den Bereich kleinerer Frequenzen – das Verhalten unterhalb 0,5 MHz zu klären und der günstigste Frequenzbereich zur Minimierung von Störeffekten zu finden. Schließlich muß eine Meßgröße für den Gutfeuchtegehalt gefunden werden, die von äußeren Parametern, wie z.B. von der Dichte, Temperatur, Zusammensetzung usw., weitgehend unabhängig ist, damit ein zusätzlicher zeitlicher und technischer Aufwand (Erwärmung des Gutes auf konstante Temperatur, Dichtebestimmung usw.) vermieden wird.

In diesem Zusammenhang würde sich die Frequenzverschiebung des Maximums von $\tan \delta$ bei sinkendem Feuchtegehalt anbieten, da dieser Effekt offenbar dichteunabhängig ist.

Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig, dieser Beitrag kann nur ein erster Schritt sein.

8. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird versucht, das bisher in der Praxis für körnige Stoffe niederen Feuchtegehalts schon recht erfolgreich eingesetzte Meßverfahren der dielektrischen Feuchtegehaltmessung auch auf heterogen zusammengesetzte, sehr feuchte Stoffgemische zu übertragen.

Nach einer kurzen Einführung in die Theorie idealer Dielektrika wird der Versuchsaufbau und das Meßverfahren beschrieben, mit dem erste eigene Erkenntnisse gewonnen wurden.

Die Meßergebnisse für die dielektrischen Größen ϵ' , ϵ'' und $\tan \delta$ an gehäckseltem Futtergras zeigen, daß neben der Gutfeuchte auch die Gutdichte und die Meßfrequenz im Frequenzbereich 0,5 ÷ 100 MHz das Verhalten beeinflussen.

Für eine abschließende Wertung, ob sich ein derartiges Meßverfahren entwickeln läßt, ist die Basis der Meßergebnisse hinsichtlich Gutart und der Meßfrequenz zur Zeit noch nicht breit genug.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Buchholz, E.: Über die Eignung bekannter Materialfeuchte-meßverfahren für den Einsatz in landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen. Deutsche Agrartechnik Bd. 22 (1972) Nr. 7, S. 317/20.
- [2] Isaacs, G.W.: Moisture testers for soils and crops. Implement & Tractor Farm Implement News Bd. 74 (1959) Nr. 2, S. 22/24.
- [3] 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.
- [4] Anonym: Wassergehaltsmesser "Marconi, Typ TF 933 A". Statens Maskinprovningar Ultuna: Medd. Nr. 1263. 1 – 3. 20/11 (1956).
- [5] Anonym: Feuchte- und Temperaturbestimmungen. Von der DLG anerkannte Temperatur- und Feuchtemeßgeräte. Landmaschinenmarkt Bd. 49 (1970) Nr. 25, S. 23/24.
- [6] Anonym: Apparat zur Feuchtigkeitsbestimmung "Cera-Tester". Statens Maskinprovningar Ultuna: Medd. Nr. 195 1341. 1 – 2. 23/7. (1958).
- [7] Bowman, G.E.: Persönliche Mitteilung aus dem N.I.A.E., Silsoe.
- [8] Ko, R.S. u. G.C. Zoerb: Dielectric constant of wheat straw. Trans ASAE Bd. 13 (1970) Nr. 1, S. 42/45, 47.
- [9] 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. 906/09, 913.
- [10] Okabe, T., M.T. Huang u. S. Okamura: A new method for the measurement of grain moisture content by the use of microwaves. J. Agric. Engng. Res. Bd. 18 (1973) S. 59/66.
- [11] Nelson, S.O. u. L.F. Charity: Frequency dependence of energy absorption by insects and grain in electric fields. Trans. ASAE Bd. 15 (1972) Nr. 6, S. 1099/1102.
- [12] 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.
- [13] 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 u. ASAE-Paper 68 - 515.
- [14] Nelson, S.O.: Microwave dielectric properties of grain and seed. Trans. ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 5, S. 902/05.
- [15] 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.
- [16] Stetson, L.E. u. S.O. Nelson: Audiofrequency dielectric properties of grain and seed. Trans. ASAE Bd. 15 (1972) Nr. 1, S. 180/84, 188.
- [17] Kraszewski, A.: Microwave instrumentation for moisture content measurement. J. Microwave Power Bd. 8 (1973) Nr. 3/4, S. 323/35.
- [18] 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.
- [19] Voss, W.A.G.: Microwave instruments for material control, Part. 1. J. Microwave Power Bd. 4 (1969) Nr. 3, S. 210/24.
- [20] ● Hasted, J.B.: Aqueous Dielectrics. London: Chapman and Hall 1973.
- [21] Mladek, J.: Bestimmung der Feuchtigkeit von Schüttgütern mittels Mikrowellenmethode (tschech.). Zem. technika Bd. 19 (1973) Nr. 8, S. 453/58.
- [22] ● Hippel von, A.R.: (Herausgeber) Dielectric materials and applications. New York, London: The Technology Press of M.I.T. and John Wiley & Sons, Inc. 1961.
- [23] Stetson, L.E. u. S.O. Nelson: Effectiveness of hot air, 39 – MHz dielectric and 2450 – MHz microwave heating for hard – seed reduction in alfalfa. Trans. ASAE Bd. 15 (1972) Nr. 3, S. 530/35.
- [24] Knipper, N.V.: Use of high-frequency currents for grain drying (Übers. aus d. Russ.). J. Agric. Engng. Res. Bd. 4 (1959) Nr. 4, S. 349/60.