

werden können. Derartige Untersuchungen sind allerdings am Institut für Landmaschinen der TU Braunschweig in Vorbereitung. Sollte die Entwicklung zu einem zentralen hydraulischen Antriebssystem auf dem Schlepper hingehen, so sind jedoch insbesondere beim Einsatz von Dauerverbrauchern die Vorteile eines Load-Sensing-Systems nicht zu übersehen.

Schrifttum

- [1] Anonym: dlz – Typentabelle Traktoren. dlz – die landtechnische Zeitschrift Bd. 29 (1979) Nr. 9, S. 1192/1235.
- [2] Harms, H.-H.: Stand und Entwicklung der Schlepperhydraulik. Grundl. Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 3, S. 95/99.
- [3] Garbers, H. u. H.-H. Harms: Energieeinsparung auch bei der Hydraulik in Ackerschleppern? Landtechnik Bd. 35 (1980) Nr. 3, S. 125/28.
- [4] Röthemeyer, H.: Stand und Entwicklung der Hydraulik in Ackerschleppern. Unveröffentlichte Diplomarbeit D 186 am Institut für Landmaschinen der TU Braunschweig 1980.
- [5] Volgt, C.: Welche Schlepper für welchen Betrieb? Landtechnik Bd. 35 (1980) Nr. 4, S. 148/50.
- [6] Regenbogen, H. u. G. Baucke: Einsatz zapfwellengetriebener Maschinen und Geräte in der Landwirtschaft. Landtechnik Bd. 32 (1977) Nr. 5, S. 189/95.
- [7] Dohne, E.: Frontkraftheber. Landtechnik Bd. 33 (1978) Nr. 11, S. 502/504.
- [8] Scheufler, B.: Forderungen angehängter Landmaschinen an die Schlepperhydraulik. Vortrag anlässlich der Internationalen Tagung Landtechnik des VDI am 13./14. Nov. 1980 in Neu-Ulm.
- [9] Hesse, H.: Vergleich der Energieverluste von Hydrauliksystemen für Ackerschlepper. Bosch-Hydraulik System-Information K6 / VLH vom 4.9.1980.
- [10] Harms, H.-H. u. B. Scheufler: Ölhydraulische Antriebe und Steuerungen in der Landtechnik. Ölhydraulik und Pneumatik Bd. 24 (1980) Nr. 11 in Vorbereitung.

Die praktische Nutzung dielektrischer Stoffeigenschaften – auch für den Bereich der Landwirtschaft

Von Heinz-Jürgen Ahlgrimm, Braunschweig-Völkenrode*)

DK 633/634.004.12:637.004.12:621.317.33

Die dielektrischen Stoffeigenschaften können für eine Reihe von Anwendungen im landwirtschaftlichen Bereich eingesetzt werden. Mit ihrer Hilfe ist nicht nur das Bestimmen von Inhaltsstoffen, von Feuchtegehalt und Produktqualität möglich, sondern sie können auch zur Steuerung bzw. Regelung von Produktionsprozessen genutzt werden.

Die Einsatzmöglichkeiten der dielektrischen Erwärmung sind besonders zahlreich: Trocknung landwirtschaftlicher Stoffe, Aufbereitung von Stoffen, Reduktion der Hartschaligkeit von Saatgut, Abtötung von Krankheitserregeren und Schadinsekten und weitere Möglichkeiten.

1. Einleitung

Die dielektrischen Eigenschaften von Stoffen, die weitgehend mit dem atomaren bzw. molekularen Aufbau der Stoffe zusammenhängen, können durch verschiedene Anwendungsmöglichkeiten in Wissenschaft, Technik und Produktion genutzt werden. Auch für landwirtschaftliche Stoffe und Nahrungsmittel bestehen solche Anwendungsmöglichkeiten, die jedoch nur zu einem geringen Teil bekannt sind.

In diesem Beitrag sollen daher nach einer kurzen Einführung in die theoretischen Zusammenhänge in der Praxis erprobte bzw. denkbare Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt bzw. Anregungen gegeben werden. Hierbei stehen Anwendungen im landwirtschaftlichen Bereich und für Nahrungsmittel im Mittelpunkt.

Diese Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie soll vielmehr mit Hilfe der zitierten Fachliteratur einen Überblick über die Möglichkeiten und Anregungen für weitere Anwendungen geben.

2. Einige grundlegende Zusammenhänge

Die Struktur von Atomen und Molekülen eines Stoffes bestimmt die dielektrischen Stoffeigenschaften (siehe Lehrbücher der Physik wie z.B. Grimsehil Bd. II und IV [1], oder von Hippel [2], Hasted [3]) weitgehend. Die grundlegenden Erscheinungen wurden vom Verfasser bereits dargestellt [4].

Sieht man von verschiedenen Sonderformen der dielektrischen Polarisation, wie z.B. von denen durch Raumladungen, an Grenzflächen und Membranen usw., ab (die für zahlreiche Effekte jedoch häufig auch verantwortlich sind), so läßt sich die komplexe (frequenzabhängige) Dielektrizitätskonstante ϵ^* eines Stoffes für einen großen Frequenzbereich durch folgende Beziehung darstellen:

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

Darin sind a_e und a_a die Anteile zur Polarisierbarkeit eines Materiebausteins (Atom, Molekül, Molekülgruppe usw.) durch

Verzerrung der Elektronenhülle (Elektronenpolarisation) gemäß Bild 1 – a_e ,

Verschiebung von Atomen, Ionen, Molekülgruppen usw. (atomare Polarisation oder Verschiebungspolarisation) gemäß Bild 2 – a_a .

Diese beiden, nahezu trägheitslosen Formen der Polarisation treten für alle Stoffe, also auch für nichtpolare Stoffe, unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes auf.

*) Dr. rer. nat. H.-J. Ahlgrimm ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

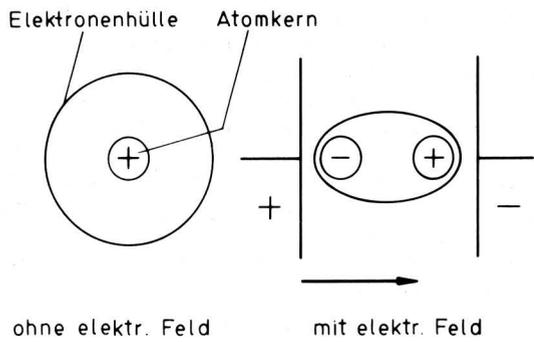


Bild 1. Elektronenpolarisation.

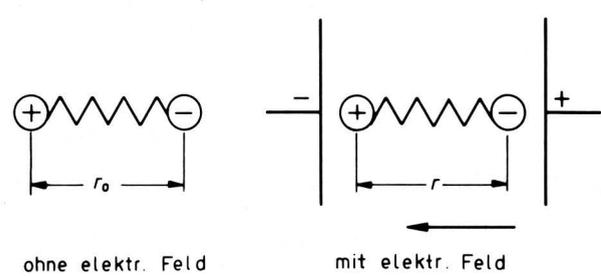


Bild 2. Atomare Polarisation.

Hierzu addiert sich bei Stoffen, deren Materiebausteine infolge einer unsymmetrischen Ladungsverteilung ein entsprechend Bild 3 definiertes permanentes Dipolmoment μ besitzen (polare Stoffe), noch ein Anteil durch die Dipolorientierung im elektrischen Feld (Orientierungspolarisation) entsprechend Bild 4, der von der Temperatur T und der Relaxationszeit τ abhängt. Diese wiederum wächst mit dem Volumen ($\sim r^3$) des Materiebausteins und mit der Viskosität η des umgebenden Mediums, sinkt jedoch mit steigender Temperatur T ab:

$$\tau = \frac{4\pi r^3 \eta}{k T} \quad (2)$$

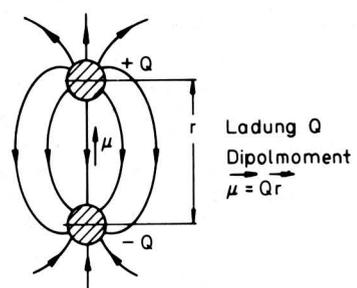


Bild 3. Schema eines Dipols.

Durch die Trägheit der Materiebausteine bei ihrer Orientierung ist die Orientierungspolarisation zeitabhängig und damit abhängig von der Frequenz $f = \omega/2\pi$ eines elektrischen Wechselfeldes. In zahlreichen Fällen spielt diese Frequenzabhängigkeit bei der Einwirkung elektrischer Felder oder hochfrequenter elektromagnetischer Wellen auf Materie eine wichtige Rolle.

Für polare Materiebausteine stellt die Orientierungspolarisation den überwiegenden Anteil zu ihrer Polarisierbarkeit dar. Nach

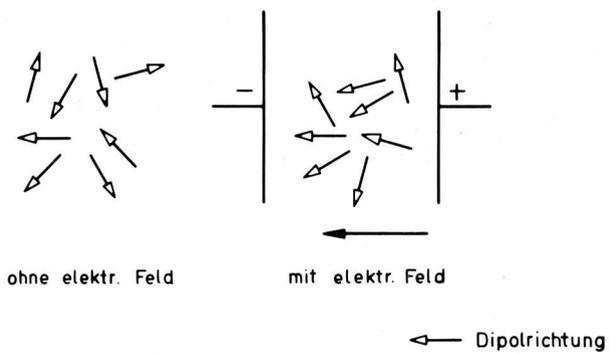


Bild 4. Orientierungspolarisation (schematisch).

Gl. (1) tragen nun alle N_L Materiebausteine eines Stoffes ($N_L = 6,023 \cdot 10^{23}$ Moleküle/Mol; Loschmidtsche Zahl) bei der Dichte ρ und mit der Molmasse M zur gesamten Polarisierbarkeit eines Stoffes bzw. zur komplexen Dielektrizitätskonstanten bei. Es bedeuten in Gln. (1) und (2) weiterhin ϵ_0 ($= 8,855 \text{ pF/m}$) die absolute Dielektrizitätskonstante für Vakuum, k ($= 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) die Boltzmannkonstante und $j = \sqrt{-1}$.

Die komplexe Dielektrizitätskonstante ϵ^* genügt dem Ansatz:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon'' \quad (3)$$

Im Grenzfall sehr kleiner ($\omega \rightarrow 0$) und sehr großer Frequenz wird nach Gl. (1) die Dielektrizitätskonstante reell:

$$\epsilon = \epsilon_s \text{ bzw. } \epsilon = \epsilon_\infty \quad (4)$$

Aus den Gln. (1) und (3) lassen sich die Frequenzabhängigkeiten für den reellen oder kapazitiven Anteil (Realteil) ϵ' und den dielektrischen Verlustfaktor ϵ'' ableiten:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{(1 + \omega^2 \tau^2 x^2)} \quad (4a)$$

$$\epsilon'' = \frac{\omega \tau x (\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{(1 + \omega^2 \tau^2 x^2)} \quad (4b)$$

$$x = \frac{\epsilon_s + 2}{\epsilon_\infty + 2} \quad (4c)$$

Als weitere dielektrische Meßgrößen werden vielfach noch die dielektrische Leitfähigkeit

$$\sigma_T = \epsilon_0 \epsilon'' \omega \quad (4d)$$

und der Verlusttangens

$$\tan \delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (4e)$$

verwendet. In zahlreichen Stoffen existiert neben der reinen dielektrischen Leitfähigkeit, insbesondere bei kleinen Frequenzen und hohen Salzgehalten, mitunter eine sehr viel höhere elektrische (Ionen-) Leitfähigkeit. Der Realteil ϵ' der Dielektrizitätskonstanten stellt den Faktor dar, um den sich die Kapazität eines leeren Kondensators bei Einbringen des Stoffes erhöht. Verlustfaktor und $\tan \delta$ sind hingegen maßgebend für die Höhe des Energiezuges aus dem elektrischen Feld und somit ein Maß für die dielektrische Erwärmung eines Stoffes.

Alle maßgebenden dielektrischen Größen sind in Bild 5 über der Frequenz aufgetragen. In dem Frequenzbereich, in dem der Realteil ϵ' stark abfällt (Dispersionsbereich), steigen Verlustfaktor ϵ'' und $\tan \delta$ stark an und erreichen ein Maximum. Die Orientierungspolarisation spielt in diesem Frequenzbereich die dominierende Rolle.

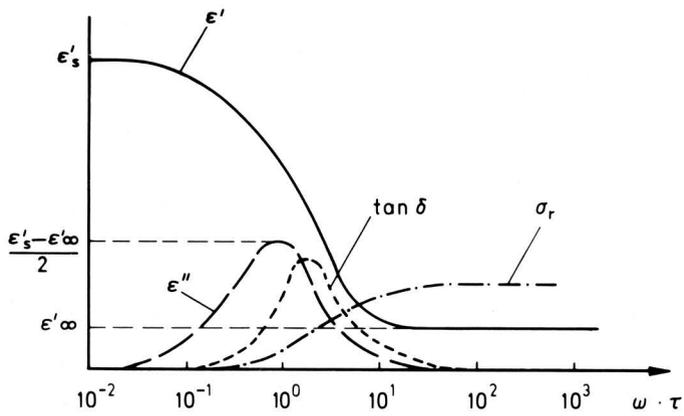


Bild 5. Frequenzabhängigkeit dielektrischer Größen (schematisch).

Wegen der geringen Massenträgheit bei der Verschiebung von Materiebausteinen (atomare Polarisation) prägt diese das dielektrische Verhalten erst im Bereich sehr kurzer Mikrowellen ($f \approx 10^{13}$ Hz) bzw. im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums [5, 6], während die Elektronenpolarisation bei noch größeren Frequenzen (sichtbares Licht, Ultraviolettbereich) bei $f > 10^{14}$ Hz wirksam wird. Beide sind verantwortlich für das optische Verhalten eines Stoffes. Im Grenzfall hoher Frequenzen, also nach dem Verschwinden der Orientierungspolarisation, geht Gl. (1) über in die Formel von Lorenz-Lorentz:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{\rho N_L}{3\epsilon_0 M} (a_e + a_a) = \frac{R}{V} \quad (5)$$

worin R die bekannte Molrefraktion eines Stoffes und $n = \sqrt{\epsilon_\infty}$ (Maxwellsche Relation) den optischen Brechungsindex darstellt.

Damit wird also deutlich, daß zwischen der Struktur der Materiebausteine eines Stoffes, seinen dielektrischen Eigenschaften und seinem optischen Verhalten Zusammenhänge bestehen. Somit kann bei Kenntnis einer oder mehrerer Größen auf eine andere oder die restlichen Größen geschlossen werden. Hiervon wird vielfach in der Molekülspektroskopie und für analytische Zwecke Gebrauch gemacht.

3. Die praktischen Nutzungsmöglichkeiten dielektrischer Stoffeigenschaften

Die chemische Zusammensetzung und physikalische Struktur eines Stoffes bestimmen somit weitgehend seine dielektrischen Eigenschaften und dementsprechend auch deren Anwendung für praktische Zwecke.

Aus der Vielfalt möglicher Anwendungen können nur einige – soweit sie für landwirtschaftliche Zwecke und benachbarte Bereiche relevant sind – eingehender dargestellt werden. Auf eine Beschreibung dielektrischer Meßmethoden muß hier verzichtet werden; hierzu wird auf das Schrifttum verwiesen, z.B. [2, 7, 8].

Eine gute Übersicht über die derzeit bekannten Daten dielektrischer Stoffe und Produkte aus der Landwirtschaft und dem Nahrungsmittelbereich, ausgestattet mit umfangreichen Schrifttumhinweisen, wurde von Nelson [9] gegeben.

3.1 Molekülstruktur sowie physikalische Struktur und chemische Zusammensetzung von Stoffen

3.1.1 Konstitution von Molekülen

Durch die Verknüpfung der atomaren bzw. molekularen Daten mit der Polarisierbarkeit, Dielektrizitätskonstanten sowie mit zahlreichen optischen Daten können aus den makroskopisch meßbaren Größen eines Stoffes Schlüsse auf die Konstitution und Struktur von Molekülen und über den Aufbau von Stoffen, insbesondere von Flüssigkeiten und Gasen gezogen werden [2, 3, 5, 8, 10].

Teilaussagen über die Struktur von Molekülen und Stoffen durch dielektrische Messungen müssen oft durch die zusätzliche Bestimmung anderer Größen, so z.B. aus dem optischen Bereich (Brechungsindex n , Molrefraktion R , Lichtstreuung, -doppelbrechung und -polarisation usw.) ergänzt werden [5].

Wichtige Aussagen über den Molekülaufbau und die Struktur von Stoffen werden auch mit Hilfe der Hochfrequenz-, Raman- und Infrarotspektroskopie gewonnen [5], die teilweise ebenfalls mit den dielektrischen Eigenschaften bei hohen Frequenzen zusammenhängen.

Die Veränderung des jeweiligen Bindungszustandes und eine damit verbundene Änderung von Dipolmomenten bei Phasenübergängen fest \rightarrow flüssig bzw. flüssig \rightarrow fest wie auch der Verlauf chemischer Reaktionen muß sich in einer Veränderung des Realteils der Dielektrizitätskonstanten äußern [8].

Ebenso können dielektrische Messungen zur Bestimmung von Teilchengrößen und -verteilung bei Absetz- und Sedimentationsvorgängen erfolgreich eingesetzt werden [8]. Wegen der Abhängigkeit vom Molekülvolumen sind durch die Bestimmung von Relaxationszeiten τ Aussagen über das Molekulargewicht [8] und die Kettenlänge von Polymermolekülen möglich.

3.1.2 Bestimmung einzelner chemischer Komponenten eines Stoffes

Über die Messung des Realteils ϵ' der Dielektrizitätskonstanten läßt sich in binären Gemischen auch der Anteil der Komponenten bestimmen, sofern die dielektrischen Daten der einzelnen Komponenten bekannt sind, die Komponenten miteinander mischbar sind und keine Wechselwirkung untereinander auftritt [8]. Weitere Voraussetzungen sind wasserfreie Proben (Störung durch den hohen statischen Anteil $\epsilon'_s \approx 80$ des Wassers und durch mögliche Wechselwirkungen) und schlechte elektrische bzw. elektrolytische Stromleitung (keine Metalle, da deren Dielektrizitätskonstante unendlich ist) der Komponenten. Dies Verfahren kann auf Stoffe mit k verschiedenen Komponenten ausgedehnt werden; da aus dielektrischen Messungen aber immer nur die Maßzahl für eine Komponente abgeleitet werden kann, müssen die Anteile der übrigen ($k - 1$) Komponenten mit anderen Methoden ermittelt werden.

Mit diesem Verfahren kann auch der Reinheitsgrad bestimmter flüssiger Rohstoffe ermittelt werden. Erfolgreiche Messungen liegen hauptsächlich für Öle und fettartige Substanzen vor [8, 11]; es läßt sich damit beispielsweise auch der Ölgehalt von Sojabohnen ermitteln [12]. Selbstverständlich kann damit auch der Wassergehalt in organischen Flüssigkeiten bestimmt werden [13]. Es wird in [13] gezeigt, daß u.U. über den Realteil der Dielektrizitätskonstanten sehr viel genauere Aussagen über die Zusammensetzung binärer Gemische (z.B. Alkohol-Wasser) möglich sind als aus dem optischen Brechungsindex n .

Die Vielfalt chemischer und physikalischer Komponenten sowie eine häufig auftretende Wechselwirkung verschiedener Komponenten untereinander (vor allem mit Wasser) in zahlreichen landwirtschaftlichen Produkten und in Nahrungsmitteln jedoch läßt dielektrische Meßmethoden für eine Stoffanalyse z.Zt. als wenig aussichtsreich erscheinen [4, 14, 15]. Es liegen dafür noch zu wenig Erfahrungen vor, obgleich für verschiedene chemische Komponenten Meßwerte bekannt sind [3, 9]. Vermutlich können für diesen Bereich dielektrische Messungen nur ergänzende Aussagen liefern.

Der Zusammenhang zwischen verschiedenen optischen und dielektrischen Stoffeigenschaften wurde durch Gl. (5) aufgezeigt. Solche optischen Eigenschaften können auch zur Analyse bestimmter Stoffe verwendet werden, wie z.B. die optische Aktivität (Drehvermögen) für die Bestimmung von Zucker (Polarimeter, Saccharimeter) oder die Molrefraktion, die für jeden Stoff eine charakteristische Größe ist, der Brechungsindex, die Infrarotabsorption (Gasanalyse) usw.

In diesem Grenzbereich läßt sich auch die Infrarotspektroskopie einordnen. Sie eignet sich infolge charakteristischer Spektren für bestimmte Moleküle und Molekülgruppen ganz besonders für ein Analysenverfahren. Zahlreiche Stoffe aus dem Nahrungsmittelbereich (Fette, Öle, Proteine, Alkohole usw.) können mit Hilfe der Infrarotspektroskopie sowohl im nahen (Wellenlänge der Strahlung zwischen 0,7–3 μm) wie auch im mittleren und fernerem Infrarotbereich (Wellenlänge 3–50 μm) nachgewiesen werden [16, 17].

Erste Erfahrungen liegen bereits für die Anwendung der Infrarotspektroskopie für eine schnelle Futterwertanalyse landwirtschaftlicher Stoffe vor [18]. Für eine weitgehende Anwendung dieses Prinzips reichen die Erfahrungen derzeit noch nicht aus. – Es kann jedoch für eine Reihe von Stoffen mit Hilfe der Infrarotabsorption deren Feuchtegehalt ermittelt werden, auch wenn teilweise ein erheblicher Aufwand für die Probenvorbereitung notwendig ist, wegen der kurzen Wellenlänge häufig Oberflächen-effekte stören und die Eindringtiefe gering ist [19].

3.1.3 Bestimmung von Feuchtegehalt (Wassergehalt) und Wasserbindung in verschiedenen Stoffen

Dielektrische Messungen unterhalb des Dispersionsbereiches für Wasser ($f \ll 10^{10}$ Hz) eignen sich ebenfalls sehr gut für eine Feuchtegehaltsbestimmung, [19] und Bild 6. Als Maße dafür dienen sowohl der Realteil ϵ' der Dielektrizitätskonstanten als auch der dielektrische Verlustfaktor ϵ'' . Im ersten Fall nutzt man den Zusammenhang, daß der Realteil ϵ' für Wasser weit unterhalb seines Dispersionsbereiches bei 20 °C etwa 80, der für zahlreiche andere organische Stoffe hingegen nur etwa zwischen 2 und 8 liegt und daß infolgedessen der resultierende Wert eines feuchten Stoffes sich entsprechend seinem Feuchtegehalt zwischen beiden Werten einstellen muß. Dies gilt jedoch nur, wenn keine Wechselwirkungsprozesse auftreten oder Wasser gebunden wird [4, 14, 15]. Für zahlreiche Stoffe mit nicht zu hohen Feuchtegehalten ist dieses Prinzip möglich, so z.B. für Getreide, Saatgut [4, 14, 20, 21, 22] aber auch bei Textilien, Papier, Folien und anderen Stoffen [19].

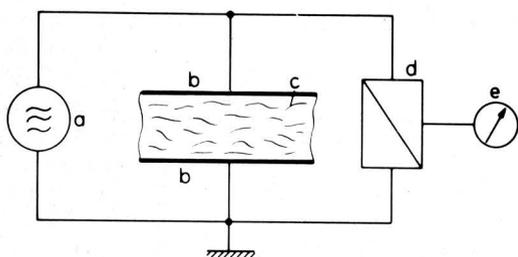


Bild 6. Dielektrische Feuchtegehaltsbestimmung (schematisch).

- | | |
|-------------------------|------------------|
| a Hochfrequenzgenerator | d Meßwertwandler |
| b Kondensator | e Anzeige |
| c Meßgut | |

Weiterhin dienen auch die hohen dielektrischen Verluste von reinem Wasser in seinem Dispersionsbereich (Maximum nach Bild 5 im Mikrowellenbereich zwischen 1 und $2 \cdot 10^{10}$ Hz) als Maß für den Feuchtegehalt eines Stoffes. Elektromagnetische Wellen in diesem Frequenzbereich werden durch freies Wasser stark absorbiert. Neben dem Vorteil, nur selektiv auf freies Wasser anzusprechen, wobei andere Stoffkomponenten kaum stören [23, 24, 25], zeigt dieses Verfahren auch Nachteile, so insbesondere hohe Inve-

stitionskosten, geringe Eindringtiefe und Meßwertverfälschungen durch Oberflächeneffekte [19].

Wird Wasser stärker an bestimmte Stoffe gebunden, so steigt seine Relaxationszeit an, während der Realteil ϵ' stark abnimmt. Aus der Veränderung der dielektrischen Daten eines wasserbindenden Stoffes oder einer Lösung können somit Schlüsse auf Art und Stärke der Bindung wie auch auf den Anteil gebundenen Wassers gezogen werden [3, 26, 27, 28].

3.1.4 Qualitätskontrolle von Produkten

Wassergehalt, Wasserbindung, chemische Zusammensetzung und die Reinheit einzelner Komponenten von Stoffen sind Kriterien, die die Qualität von Produkten beschreiben. Versuche, weitere Qualitätsmerkmale über dielektrische Messungen zu finden, sind mehrfach an verschiedenen Produkten unternommen worden: Wahrscheinlich sind durch dielektrische Messungen (Realteil ϵ' der Dielektrizitätskonstanten) Aussagen über den Reifezustand von Äpfeln möglich [29]. Nach Messungen im Frequenzbereich 300–900 MHz ist der Realteil ϵ' für reife Äpfel kleiner und zeigt gegenüber unreifen Äpfeln eine starke Dispersion (zunehmende Bildung wasserlöslicher Pektine mit fortschreitender Reife und Veränderung der Wasserbindung [29]). Bei Pfirsichen dagegen steigt im Frequenzbereich zwischen 0,5 und 5 kHz der Realteil ϵ' und der Verlusttangens mit zunehmender Reife an [30].

Obleich die elektrische Leitfähigkeit von Eigelb und Eiweiß im Ei mit Hilfe elektromagnetischer Wellen bestimmt werden kann, scheiden offensichtlich derartige Messungen zur Beurteilung der Eiqualität aus [31].

Die elektrische Leitfähigkeit von Milch sinkt mit steigendem Fett- und Proteingehalt; in gleicher Weise beeinflusst auch die Laktosekonzentration die Leitfähigkeit [32]. Ob diese Größe ein Qualitätsmerkmal für die Milch sein kann, bleibt fraglich, zumal auch weitere Substanzen die Leitfähigkeit beeinflussen: Zwischen der Leitfähigkeit und der Leukozytenanzahl (als Kennzeichen für eine Mastitisinfektion) in der Milch soll ebenfalls eine Korrelation bestehen [33]. Für eine gegebene elektrische Leitfähigkeit ist der Bereich für die Leukozytenanzahl jedoch so groß, daß die Leitfähigkeit kein Kriterium für eine Mastitisinfektion sein kann.

Feuchtegehalt, Feuchteverteilung und Salzgehalt beeinflussen den Realteil der Dielektrizitätskonstanten für Butter [34]. Dennoch sollen Feuchtegehaltsbestimmungen für Butter nach dem dielektrischen Meßprinzip möglich sein [35].

Es sind möglicherweise eine Reihe weiterer ähnlicher Anwendungsfälle denkbar oder in der Praxis erprobt, die dem Verfasser jedoch derzeit noch nicht bekannt sind.

3.2 Nutzung dielektrischer Eigenschaften zur Regelung von Prozessen

Neben der Bestimmung der Produktqualität gibt es auch Möglichkeiten, die dielektrischen Eigenschaften direkt zur Regelung von Maschinen und anderen Produktionseinrichtungen einzusetzen. Hierzu gehören z.B. dielektrische Sonden zur Füllstandsmessung und Niveauregulierung in Behältern [8].

Die u.a. von Gutart, Größe und Feuchtegehalt abhängige Aufladung von Samen in einem elektrischen Feld wird über die Kraftwirkung des elektrischen Feldes auf Ladungen dazu genutzt, Körner nach Größe, Gewicht und Feuchtegehalt zu sortieren [36, 37], verschiedene Fraktionen schneller voneinander zu trennen und sie von Verunreinigungen zu befreien [38, 39]. Die Sortierung erfolgt dabei durch unterschiedliche Haftkräfte zwischen den geladenen Körnern und ihrer Unterlage bzw. durch ihre unterschiedliche Ablenkung im elektrischen Feld während des freien Falls, Bild 7. Es ist damit sogar eine Sortierung nach der Lebensfähigkeit von Saatgutkörnern möglich [40]. Dabei ist allerdings nicht klar, ob dieser letztgenannte Effekt durch die höhere elektrische Leitfähigkeit oder geringere Kapazität von Körnern mit geringerer Lebensfähigkeit verursacht wird.

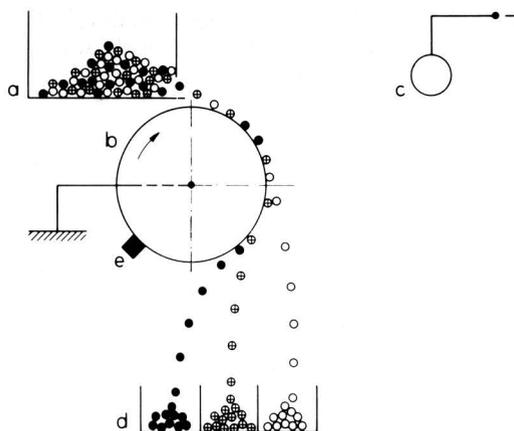


Bild 7. Elektrische Körnertrennung.

- | | |
|----------------------|------------------|
| a Gutaufgabe | d sortiertes Gut |
| b geerdete Walze | e Abstreifer |
| c negative Elektrode | |

Unterschiede in der Schwächung elektromagnetischer Wellen aufgrund von Unterschieden in Realteil ϵ' und Verlustfaktor ϵ'' zwischen Steinen und Bodenkluten einerseits sowie von Rübenwurzeln und Kartoffelknollen andererseits sind für eine Werkzeugführung von Maschinen geeignet [41].

Da Mikrowellen durch Getreideähren viel stärker geschwächt werden als durch Halme und die Schwächung mit der Bestandsdichte zunimmt, wäre eine Regelmöglichkeit für den Mähdrescher in bezug auf Fahrgeschwindigkeit und Ährenhöhe möglich [42]. Der Realteil ϵ' von Stroh steigt mit der Dichte und dem Feuchtegehalt [43] an. Auch über diese Zusammenhänge ließe sich demnach eine Regelung für Mähdrescher erreichen.

3.3 Dielektrisches Erwärmen, Heizen, Trocknen usw. mit Hochfrequenzenergie

3.3.1 Dielektrisches Trocknen

Wenn in hochfrequenten elektrischen Feldern die Dipolorientierung den schnellen Feldwechseln nicht mehr folgen kann, steigen die dielektrischen Verluste durch Molekülstöße, Ladungstransport usw. steil an. Dies führt zu einem Energieentzug aus dem elektrischen Feld und zur Erwärmung des Stoffes. Dieser Effekt kann gezielt zur Trocknung von Stoffen genutzt werden. Dabei wird dem polaren oder feuchten Stoff die Wärme nicht wie in konventionellen Trocknungsanlagen von außen, sondern von innen her zugeführt [44, 45, 46]. Dies führt zu einer gleichmäßigen, schnellen Erwärmung des Stoffes auch bei schlechter Wärmeleitung und zu einer leichteren und besseren Ableitung des entstehenden Wasserdampfes gegenüber konventionellen Trocknungsverfahren mit Wärmezufuhr von außen. Dabei verkürzt sich die Trocknungszeit und die Produktqualität wird erhöht [44, 46, 47]. Die dabei in dem Trocknungsgut pro Volumeneinheit erzeugte Wärmeleistung W ist den dielektrischen Verlusten ϵ'' , dem Quadrat der elektrischen Feldstärke E und der Frequenz $f = \omega/2\pi$ proportional [45, 48 bis 51]:

$$W = \omega \epsilon_0 \epsilon'' E^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon' \tan \delta E^2 \quad (6)$$

Für den Rundfunkwellenbereich werden Gutbehälter als Kondensatoren ausgebildet, **Bild 8**, während im Mikrowellenbereich dafür Hohlraumresonatoren verwendet werden müssen.

Durch die hohen dielektrischen Verluste von freiem Wasser im Bereich von 10–20 GHz sind Mikrowellen für die Trocknung besonders geeignet. Wegen ihrer größeren Effektivität gegenüber Wellen im Rundfunkbereich können die Feldstärken und somit die Geräteleistungen für denselben Effekt geringer ausgelegt werden [48]. Mit steigender Frequenz sinkt jedoch die Eindringtiefe

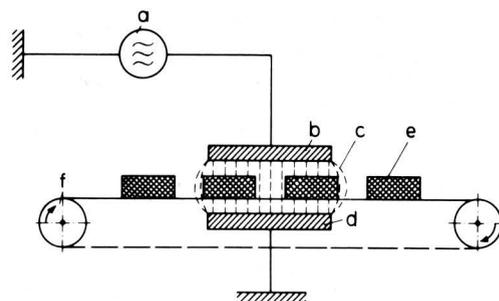


Bild 8. Dielektrische Trocknung von Stoffen (schematisch).

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| a Hochfrequenzleistungsgenerator | d geerdete untere Elektrode |
| b obere Elektrode | e Trocknungsgut |
| c elektrische Feldlinien | f Fördereinrichtung |

[2, 47, 48] und damit die eingebrachte Wärmeleistung, was für die Trocknung bestimmter Güter durch Mikrowellen nachteilig sein kann. Die Eindringtiefe steigt jedoch wieder, wenn der Wassergehalt abnimmt (Selbstregulierung, [45, 48]). Die günstigsten Bedingungen für das jeweilige Trocknungsgut hängen von seinen dielektrischen Daten und von seinen geometrischen Abmessungen ab [44, 45, 47].

Die dielektrische Erwärmung ist bisher für zahlreiche Stoffe eingesetzt worden: In [44, 48] werden Probleme und Anwendungsmöglichkeiten im Radiofrequenz- und Mikrowellenbereich für das Auftauen, Erwärmen, Trocknen, Blanchieren, Pasteurisieren und Sterilisieren von Lebensmitteln diskutiert. Dafür wird heute in zunehmendem Maße der Mikrowellenherd eingesetzt, insbesondere auch bei der Zubereitung von Nahrungsmitteln und Speisen. Zur Beschleunigung der Trocknung landwirtschaftlicher Stoffe für eine schnelle Trockensubstanz- bzw. Feuchtegehaltsbestimmung hat sich der Mikrowellenherd seit einigen Jahren gut bewährt, bei Trocknungszeiten zwischen etwa 15–30 min [52]. Eine solche Trocknungseinrichtung, die es inzwischen schon mehrfach in der FAL gibt, zeigt **Bild 9**.



Bild 9. Mikrowellentrocknungseinrichtung zur Feuchtegehaltsbestimmung.

Über positive Auswirkungen der dielektrischen Getreidetrocknung im Frequenzbereich von 10 MHz in bezug auf die Produktqualität wird in [46] berichtet. Für die reine dielektrische Trocknung liegt allerdings der auf die Einheit verdampften Wassers bezogene Energieverbrauch mit 2,9–3,5 kWh/kg (10400 bis 12600 kJ/kg) sehr hoch, reduziert sich jedoch auf 1,4–1,85 kWh/kg (5040–6660 kJ/kg), wenn die dielektrische Trocknung durch Warmluft (z.B. Nutzung der Abwärme der HF-Sender-Leistungsröhren) unterstützt wird [46].

Die Vorbehandlung von gehäckseltem Grünut in einem hochfrequenten elektromagnetischen Feld bewirkt für eine anschließende, mechanische Dehydrierung gegenüber mechanischen Aufschlußverfahren eine Verbesserung der Entfeuchtung [53]. In der Holzindustrie werden elektromagnetische Wellen im Radiofrequenzbereich zur Holz Trocknung [45, 54] bzw. zur selektiven Trocknung von Leim bei der Holzverarbeitung eingesetzt [49].

Weitere Einsatzgebiete für die Hochfrequenz Trocknung sind die Tabak-, Textil-, Kunststoff- und Gummiindustrie [45, 49], doch nimmt sie in keinem der Bereiche eine bevorzugte Stellung ein.

Die Kosten für die dielektrische Erwärmung sind, wie das Beispiel der Körnertrocknung zeigt, sehr hoch, häufig viel höher als mit konventionellen Verfahren [48, 49]. Sie ist demnach nur für höherwertige Produkte oder dann zu empfehlen, wenn keine andere Möglichkeit bleibt, so z.B. für eine Resttrocknung bei konventionellen Trocknungsverfahren oder für eine schnelle innere Erwärmung eines Stoffes.

Möglicherweise ließen sich bei geeigneter Wahl der Arbeitsfrequenz für einen Trocknungsvorgang die Energiekosten senken, doch sind durch den Gesetzgeber [55] für den Betrieb solcher Anlagen nur bestimmte Frequenzen bei sehr engen Toleranzen im Rundfunkwellenbereich (13,56 MHz, 27,12 MHz, 40,68 MHz), im UHF-Bereich (461,04 MHz) und im Mikrowellenbereich (2,45 GHz, 5,80 GHz und 24,125 GHz) zugelassen. Es kann demnach nicht immer der günstigste Bereich für die Trocknung gewählt werden.

3.3.2 Aufbereitung von körnigem Gut

Durch die dielektrische Erwärmung ist es ebenfalls möglich, Körner besser aufzubereiten bzw. aufzuschließen. Derart aufgeschlossene Körner sollen nach der Aufnahme durch das Tier besser umgesetzt werden [56]. Entsprechende Untersuchungen für den Aufschluß von Hirse wurden im Mikrowellenbereich (2,45 GHz) durchgeführt. Mit der eingebrachten Leistungsdichte der Mikrowellenstrahlung stieg auch der Aufschlußgrad. Der eigentliche Aufschluß begann aber erst bei Temperaturen über 100 °C und erreichte bei etwa 175 °C ein Maximum. Insgesamt konnten jedoch nur etwas weniger als 50 % der Körner damit aufbereitet werden [56].

Generell kann wohl durch eine Behandlung von hartschaligem Saatgut in elektromagnetischen Feldern eine Verbesserung der Keimfähigkeit erreicht werden. Leguminosensaatgut (Luzerne) zeigte nach einer Behandlung mit elektromagnetischen Wellen im Rundfunkwellenbereich wie auch mit Mikrowellen eine Reduktion der Hartschaligkeit (Aufnahme von Wasser und Sauerstoff wird erhöht) und eine Verbesserung der Keimfähigkeit [57]. In gleicher Weise soll jedoch auch eine Behandlung im elektrischen Gasentladungsraum wie auch eine Erwärmung durch Infrarotstrahlung wirken [58].

3.3.3 Abtötung von Bakterien, Krankheitskeimen und Kerbtieren

Die Wärmewirkung infolge dielektrischer Verluste kann auch gut zum Pasteurisieren und Sterilisieren (vollständige Abtötung von Krankheitskeimen und Inaktivierung von Enzymen) bei Lebensmitteln dienen [44, 48]. Derart behandelte Nahrungsmittel sollen in ihrer Qualität mit gefrorenem Gut vergleichbar sein.

In Versuchen, bei denen durch Kückenflaum und Krankheitskeime kontaminierte Luft in Brutanlagen einer Mikrowellenstrahlung (2,45 GHz) ausgesetzt wurde, konnte nach einer Bestrahlungszeit von 45 s eine Abtötungsrate von 80 % und mehr beobachtet werden [59].

Der große Unterschied zwischen den dielektrischen Verlusten von Getreide bzw. Saatgut einerseits und verschiedenen Kerbtieren andererseits könnte auch zur Abtötung solcher Schadinsekten durch selektives Aufheizen eingesetzt werden [51, 60, 61]. Dabei werden diese viel stärker dielektrisch aufgeheizt, als der betreffende zu schützende Stoff. Bei ökonomischer Betrachtung soll ein solches Verfahren gegenwärtig gegenüber chemischen Behandlungsverfahren noch nicht konkurrenzfähig sein, aus der Sicht des Umweltschutzes hingegen wäre das dielektrische Verfahren zu bevorzugen.

3.4 Grenzbereiche Medizin, Elektrotechnik

Die vorstehenden Abschnitte zeigen, daß sich bei Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften von landwirtschaftlichen Stoffen und von Nahrungsmitteln eine Reihe von Produktionsverfahren vereinfachen und verbessern ließen, wobei die Produktqualität sehr häufig erhöht werden könnte.

Die dielektrischen Stoffeigenschaften haben jedoch nicht nur für die hier genannten Produkte eine hohe Bedeutung, sondern sie spielen auch in anderen Bereichen eine bedeutende Rolle [62]. Ein weiteres Einsatzgebiet ist z.B. die physikalische Medizin, wo für zahlreiche Diagnose- und Therapiemethoden, wie Kardiologie (Messung von Herzströmen [26]), Enzephalographie (Messung von Gehirnströmen [3]), Diathermie (Hochfrequenzerwärmung von Geweben), Hochfrequenzchirurgie, dielektrische Daten menschlicher Gewebe benötigt werden.

Diese gewinnen auch zunehmend an Bedeutung für die Festlegung zulässiger Grenzbelastungen bestimmter Gewebetypen, wie z.B. für das menschliche Auge und für andere Organe [3, 47, 63], da die Verbreitung teilweise starker Hochfrequenzquellen, wie z.B. von Radar, Kommunikationssystemen, Industriegeneratoren, Mikrowellenherden usw., ständig zunimmt und somit auch die von solchen Geräten ausgehende mögliche Gefährdung durch Streustrahlung.

Auf die Bedeutung dielektrischer Stoffeigenschaften für die Nachrichtentechnik und Elektroindustrie kann wegen der Vielfalt von Anwendungsmöglichkeiten nur pauschal hingewiesen werden, so z.B. auf den Einfluß dielektrischer Eigenschaften der Luft für die Ausbreitung kurzer Wellen (Ultrakurzwellen- und Fernbereich [64]). Aber auch auf weitere Anwendungen außerhalb dieser Bereiche kann im Rahmen dieses Beitrages nicht weiter eingegangen werden.

4. Zusammenfassung

Die dielektrischen Eigenschaften von Stoffen können für eine Reihe verschiedener Anwendungsfälle genutzt werden. Diese überstreichen den Bereich chemischer Stoffanalysen (über den Zusammenhang zwischen dem Aufbau von Molekülen eines Stoffes und seinen dielektrischen und optischen Eigenschaften) bis zur automatischen Steuerung von Produktionsprozessen. Für landwirtschaftliche Stoffe scheinen die dielektrischen Eigenschaften insbesondere für die

- dielektrische Feuchtegehaltsbestimmung,
- dielektrische Erwärmung und Trocknung,
- Bekämpfung von Schadinsekten in Erntegütern,
- die meßtechnische Erfassung und Regelung von Produktionsprozessen,
- die Abtötung von Krankheitskeimen

von Bedeutung zu sein. Weitere Anwendungsfälle sind denkbar. Daneben werden jedoch auch Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Nahrungsmittelindustrie und der Medizin aufgezeigt.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] • **Grimsehl**: Lehrbuch der Physik, Bd. II: Elektromagnetisches Feld; Bd. III: Optik; Bd. IV: Struktur der Materie. Basel: Pfalz-Verlag 1967.
- [2] • **von Hippel, A.R. (Hrsg.)**: Dielectric materials and application. New York/London: The Technology Press of M.I.T. and John Wiley & Sons 1961.
- [3] • **Hasted, J.B.**: Aqueous dielectrics. London: Chapman and Hall 1973.
- [4] **Ahlgrimm, H.-J.**: Ein Beitrag zur Bestimmung des Feuchtegehaltes an sehr feuchten organischen Stoffen. Grndl. Landtechnik Bd. 25 (1975) Nr. 6, S. 165/72.
- [5] • **Finkelburg, W.**: Einführung in die Atomphysik. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer 1964.
- [6] • **Colthup, N.B., L.H. Daly u. S.E. Wiberley**: Introduction to infrared and Raman-spectroscopy. New York/San Francisco/London: Academic Press 1977.
- [7] • **Kohrausch, F. (Hrsg.)**: Praktische Physik, Bd. II. Stuttgart: B.G. Teubner 1962.
- [8] • **Oehme, F.**: Dielektrische Meßmethoden. Weinheim/Bergstraße: Verlag Chemie 1962.
- [9] **Nelson, S.O.**: Electrical properties of agricultural products – A critical review. Trans. ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 2, S. 384/400.
- [10] • **Näser, K.H.**: Physikalische Chemie. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1974.
- [11] **Kohn, R.**: Die Anwendung dielektrischer Meßmethoden in der Lebensmittelanalytik. Fette-Seifen-Anstrichmittel Bd. 72 (1970) Nr. 10, S. 895/98.
- [12] **Hunt, W.H., M.H. Neustadt, J.R. Hart u. L. Zeleny**: A rapid dielectric method for determining the oil content of soybeans. J. Amer. Oil Chem. Soc. Bd. 29 (1952) Nr. 7, S. 258/61.
- [13] **Lertes, E. u. F. Niel**: Zur Bestimmung der quasistatischen Dielektrizitätskonstanten als Kenngröße für die Identität und Reinheit von flüssigen Rohstoffen bei Zimmertemperatur. GIT Fachz. Lab. Bd. 23 (1979) Nr. 5, S. 376/78.
- [14] **Ahlgrimm, H.-J.**: Zur dielektrischen Bestimmung des Feuchtegehaltes von Lebensmitteln. Zeitschrift Lebensmittel-Verfahrenstechnik Bd. 28 (1977) Nr. 8, S. 305/11.
- [15] **Ahlgrimm, H.-J.**: Die Grenzen und Möglichkeiten der dielektrischen Feuchtegehaltsbestimmung an Futterstoffen im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 50 MHz. Grndl. Landtechnik Bd. 29 (1979) Nr. 1, S. 25/32.
- [16] **Kohn, R. u. S. Laufer-Heydenreich**: Anwendung der Infrarotspektroskopie in der Lebensmittelanalytik, II. Mitteilung: IR-Spektroskopie im nahen Infrarot (0,7–3 μm) und fernem Infrarot (15–50 μm). Z. Lebensmittel-Unters. u. -Forsch. Bd. 129 (1966) S. 92/96.
- [17] **Kohn, R.**: Anwendung der Infrarotspektroskopie in der Lebensmittelanalytik, I. Mitteilung: Infrarotspektroskopie im mittleren IR-Bereich von 3–15 μm . Z. Lebensmittel-Unters. u. -Forsch. Bd. 129 (1965) S. 28/40.
- [18] **Norris, K.H., R.F. Barnes, J.E. Moore u. J.S. Shenk**: Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy. J. Animal Sc. Bd. 43 (1976) S. 889/97.
- [19] **Ahlgrimm, H.-J.**: Verschiedene Möglichkeiten der Feuchtegehaltsbestimmung. Landbauf. Völknerode Bd. 27 (1977) Nr. 2, S. 97/104.
- [20] **Rietz, S.**: DLG-Maschinenprüfbericht Nr. 2093, Gruppe 4 b/13. Frankfurt: DLG-Verlag 1972.
- [21] **Matthews, J.**: The design of an electrical capacitance type moisture meter for agricultural use. J. Agric. Eng. Res. Bd. 8 (1963) Nr. 1, S. 17/30.
- [22] **Buchholz, E.**: Über die Eignung bekannter Materialfeuchte-meßverfahren für den Einsatz in landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen. Deutsche Agrartechnik Bd. 22 (1972) Nr. 7, S. 317/20.
- [23] **Okabe, T., M.R. Huang u. S. Okamura**: A new method of measuring grain moisture content by the use of microwaves. J. Agr. Eng. Res. Bd. 18 (1973) S. 59/66.
- [24] **Kraszewski, A.**: Microwave instrumentation for moisture content measurement. J. Microwave Power Bd. 8 (1973) Nr. 3/4, S. 323/55.
- [25] **Mladek, J.**: Bestimmung der Feuchtigkeit von Schüttgütern mittels Mikrowellenmethode. (tschech.) Zemed. technika Bd. 19 (1973) Nr. 8, S. 453/58.
- [26] **Schwan, H.P.**: Electrical properties of tissue and cell suspensions. In: Advances in Biological and Medical Physics, Bd. 5, Berkeley: Univ. of California 1957.
- [27] **de Loor, G.P.**: Dielectric properties of heterogenous mixtures containing water. J. Microwave Power Bd. 3 (1968) S. 69/73.
- [28] **de Loor, G.P. u. F.W. Meijboom**: The dielectric constant of foods and other material with high water content at microwave frequencies. J. Food Techn. (1966) Nr. 1, S. 313/22.
- [29] **Thompson, D.R. u. G.L. Zachariah**: Dielectric theory and bioelectrical measurements, Part II. Trans. ASAE Bd. 14 (1971) Nr. 2, S. 214/15.
- [30] **Mc Lendon, B.D. u. R.H. Brown**: Dielectric properties of peaches as a maturity index. ASAE-Paper Nr. 71-332 (1971).
- [31] **Norris, K.H. u. A.W. Brant**: Radiofrequency as a mean of grading eggs. Food Technol. Bd. 6 (1952) Nr. 6, S. 204/208.
- [32] **Pinkerton, F. u. I.I. Peters**: Conductivity, per cent lactose and freezing point of milk. J. Dairy Sc. Bd. 41 (1958) S. 392/97.
- [33] **Little, T.W.A., C.N. Herbert u. D. Torbes**: Electrical conductivity and the leucocyte count of bovine milk. Veterin. Rec. Bd. 82 (1968) S. 431/33.
- [34] **Parkash, S. u. J.G. Armstrong**: Measurement of dielectric constant of butter. Dairy Ind. Bd. 35 (1970) Nr. 10, S. 688/89.
- [35] **Gildemeister, E. u. H.-J. Raeuber**: Kontinuierliche dielektrische Feuchtigkeitsmessung an Lebensmitteln. I.: Ermittlung der Einflußfaktoren bei der dielektrischen Feuchtigkeitsmessung. Die Lebensmittelindustrie Bd. 23 (1976) Nr. 11, S. 489/94.
- [36] **Smigel, V.N.**: Abscheidung von Getreidekörnern auf Sieben im elektrischen Feld. (russ.) Mechanizacija i elektrifikacija Bd. 22 (1964) Nr. 1, S. 33/37.
- [37] **Booster, D.E.**: Application of electrostatic separation principles to cleaning seeds of certain field crops. Master of Science Thesis, Oregon State College 1956.
- [38] **Basov, A.M.**: Verwendung elektrischer Felder in der Landtechnik. (russ.) Mechanizacija i elektrifikacija Bd. 26 (1968) Nr. 7, S. 10/11.
- [39] **Harmond, J.E., N.R. Brandenburg u. D.E. Booster**: Seed cleaning by electrostatic separation. Agric. Engr. Bd. 42 (1961) Nr. 1, S. 22/25.
- [40] **Matthes, R.K. u. A.H. Boyd**: Electrical properties of seed associated with viability and vigor. Trans. ASAE Bd. 12 (1969) Nr. 6, S. 778/81.
- [41] **Sakalo, L.G., V.P. Safranov, G.M. Lysenko, I.A. Braznikov u. V.V. Kovalchuk**: Radiowellen zur Erkennung von Wurzeln und Knollenfrüchten sowie von Kluten und Steinen. (russ.) Mechanizacija i elektrifikacija Bd. 27 (1969) Nr. 9, S. 18/20.

- [42] *Story, A.G., W.H. Johnson u. R.E. Stewart*: Remote measurement of concentration and height of heads of standing grain with microwave energy.
Trans. ASAE Bd. 13 (1970) Nr. 1, S. 28/32.
- [43] *Ko, R.S. u. G.C. Zoerb*: Dielectric constant of wheat straw.
Trans. ASAE Bd. 13 (1970) Nr. 1, S. 42/45 u. 47.
- [44] *Sale, A.J.H.*: A review of microwaves for food processing.
J. Food. Technol. Bd. 11 (1976) S. 319/29.
- [45] *Kröll, K.*: Trocknungstechnik Bd. II: Trockner und Trocknungsverfahren.
Berlin/Göttingen/Heidelberg/New York: Springer 1978.
- [46] *Knipper, N.V.*: Use of highfrequency currents for grain drying (Übers. aus d. Russ.).
J. Agric. Engng. Res. Bd. 4 (1959) Nr. 4, S. 349/60.
- [47] *Copson, D.A.*: Microwave Heating.
Westport/Conn.: The AVI Publishing Company 1962.
- [48] *Bengtsson, N.E.*: Dielectric heating as a unit operation in food processing. Heating fundamentals and applications of radio frequency and microwaves.
Confructa Bd. 21 (1976) Nr. 1/2, S. 7/23.
- [49] *Sobotka, H.*: Hochfrequenzindustriegeratoren für induktive Erwärmung.
Philips Technische Bibliothek 1962.
- [50] *Pace, W.E., W.B. Westphal, S.A. Goldbith u. D. van Dyke*: Dielectric properties of potatoes and potato chips.
J. Food Sc. Bd. 33 (1968) S. 37/42.
- [51] *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.
- [52] *Schild, G.-J. u. H. Honig*: Methodische Untersuchungen zur Bewertung von Grundfutter. 1. Teil: Schnellbestimmung des Trockenmassegehaltes in Grundfutter.
Ber. über Landwirtschaft 191. Sonderheft (1975) S. 393/401.
- [53] *Orth, H.W.*: Mechanisches Dehydrieren von Halmgut nach einer Aufbereitung mit Hochfrequenzenergie.
Landt. Forschung Bd. 19 (1971) Nr. 5/6, S. 147/51.
- [54] *Gefarth, J.*: Holztrocknung durch kombinierte Hochfrequenz- und Kontakterwärmung.
Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 28 (1970) S. 53/58.
- [55] Anonym: Gesetz über den Betrieb von Hochfrequenzanlagen nebst Verwaltungsanweisung mit 4 Anlagen.
G 12391, Amtsblatt des Bundesministers für das Post- und Fernmeldewesen, Ausgabe A Nr. 113 vom 28.8.1969, Bonn.
- [56] *Berwinkle, K.R. u. W.C. Cune*: Factors effecting eversion of sorghum grain using energy in the 2450 MHz-Range.
Trans. ASAE Bd. 12 (1969) Nr. 3, S. 295/97.
- [57] *Nelson, S.O., L.A.T. Ballard, L.E. Stetson u. T. Buchwald*: Increasing legume seed germination by VHF and microwave dielectric heating.
Trans. ASAE Bd. 19 (1976) Nr. 2, S. 369/71.
- [58] *Nelson, S.O., L.E. Stetson, R.B. Stone, J.C. Webb, C.A. Pettibone, D.W. Works, W.R. Kehr u. G.E. van Riper*: Comparison of infrared, radiofrequency and gasplasma treatments of alfalfa seed for hard seed reduction.
Trans. ASAE Bd. 7 (1964) Nr. 3, S. 276/80.
- [59] *Sprayberry, R.E., J. Koon u. S.A. Edgar*: Sterilization of air contaminated with chick fluff by microwave irradiation.
Trans. ASAE Bd. 17 (1974) Nr. 3, S. 570/72.
- [60] *Nelson, S.O., L.E. Stetson u. J.J. Rhine*: Factors influencing effectiveness of stored-grain insect control.
Trans. ASAE Bd. 9 (1966) Nr. 6, S. 809/15.
- [61] *Nelson, S.O. u. W.K. Whitney*: Radio fields for stored grain insect control.
Trans. ASAE Bd. 3 (1960) Nr. 2, S. 133/37 u. 141.
- [62] *Schwan, H.P.*: Alternating current spectroscopy of biological substances.
Proc. Inst. of Radio Engineers Bd. 47 (1959) Nr. 11, S. 1841/55.
- [63] *Schwan, H.P. u. K. Li*: Hazards due to total body irradiation by radar.
Proc. Inst. of Radio Engineers Bd. 44 (1952) S. 1572/81.
- [64] Anonym: Hütte IV B. Elektrotechnik, Teil B: Fernmelde-technik.
Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn 1962.



VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1980

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.