



Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ **PATENTSCHRIFT** A5

⑫① Gesuchsnummer: 5353/80

⑫② Anmeldungsdatum: 11.07.1980

⑫③ Priorität(en): 14.07.1979 DE 2928487

⑫④ Patent erteilt: 15.08.1985

⑫⑤ Patentschrift
veröffentlicht: 15.08.1985

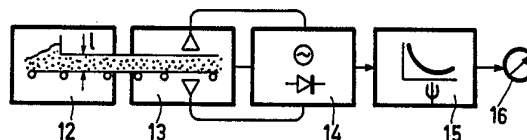
⑫⑥ Inhaber:
N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven
(NL)

⑫⑦ Erfinder:
Meyer, Wolfgang, Seevetal (DE)
Schilz, Wolfram, Norderstedt (DE)

⑫⑧ Vertreter:
Patentanwalts-Bureau Isler AG, Zürich

⑫⑨ **Verfahren und Vorrichtungen zum dichtenunabhängigen Messen der relativen Feuchte eines Messgutes mit Hilfe von Mikrowellen.**

⑫⑩ Zum dichtenunabhängigen Messen der relativen Feuchte eines Messgutes wird dieses in einen Mikrowellenapplikator (13) gegeben, der bekannte mechanische und elektrische Eigenschaften bei Abwesenheit des Messgutes hat. Der Einfluss, den das Messgut auf die dielektrischen Eigenschaften des Mikrowellenapplikators (13) bei der Messfrequenz hat, wird mittels Detektoren (14) und einer Signalverarbeitungseinheit (15) gemessen. Die Signalverarbeitungseinheit (15) ermittelt dichtenunabhängig einen aus dem Realteil und dem Imaginärteil der dielektrischen Konstanten bestehenden Wert, mit welchem aus einer Eichkurve die relative Feuchte bestimmt und mittels einer Anzeigevorrichtung (16) wiedergegeben wird. Auf diese Weise lässt sich die relative Feuchte des Messgutes auf einfache und genaue Weise unabhängig von der Dichte messen.



PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum dichtenunabhängigen Messen der relativen Feuchte ψ eines Messgutes mit Hilfe von Mikrowellen, welches Verfahren die nachfolgenden Schritte umfasst:

(a) das Messgut in einen Mikrowellenapplikator geben, welcher Mikrowellenapplikator, ohne Messgut, bekannte mechanische und elektrische Eigenschaften aufweist;

(b) das Messen des Einflusses, den das Messgut auf die dielektrischen Eigenschaften des Mikrowellenapplikators bei der Messfrequenz ausübt; dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren weiterhin die nachfolgenden Schritte umfasst:

(c) das Ermitteln einer Grösse A, die durch die folgende Formel gegeben ist:

$$A = \frac{\varepsilon'(\psi, \rho) - 1}{\varepsilon''(\psi, \rho)}$$

wobei $\varepsilon'(\psi, \rho)$ der Realteil und $\varepsilon''(\psi, \rho)$ der Imaginärteil der dielektrischen Konstante $\varepsilon = \varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon'')$ ist und ρ die Dichte des Messgutes darstellt;

(d) mit dem in dem vorhergehenden Schritt ermittelten Wert für A die relative Feuchte ψ aus einer Eichkurve $A(\psi)$ ableiten, welche Eichkurve für das Material des Messgutes und die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Applikators spezifisch ist.

2. Verfahren zum dichtenunabhängigen Messen der relativen Feuchte ψ eines Messgutes mit Hilfe von Mikrowellen, welches Verfahren die nachfolgenden Schritte umfasst:

(a) das Messgut in einen Mikrowellenapplikator geben, welcher Mikrowellenapplikator, ohne Messgut, bekannte mechanische und elektrische Eigenschaften aufweist;

(b) das Messen des Einflusses, den das Messgut auf die dielektrischen Eigenschaften des Mikrowellenapplikators bei der Messfrequenz ausübt; dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren weiterhin die nachfolgenden Schritte umfasst:

(c) das Ermitteln einer Grösse A, die durch die folgende Formel gegeben ist:

$$A = \frac{\varepsilon'(\psi, \rho) - 1}{\tan \delta}$$

wobei $\varepsilon'(\psi, \rho)$ der Realteil und $\varepsilon''(\psi, \rho)$ der Imaginärteil der dielektrischen Konstante $\varepsilon = \varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon'')$ ist, $\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ und ρ die Dichte des Messgutes darstellt.

(d) mit dem in dem vorhergehenden Schritt ermittelten Wert für A die relative Feuchte ψ aus einer Eichkurve $A(\psi)$ ableiten, welche Eichkurve für das Material des Messgutes und die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Applikators spezifisch ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei der erste Schritt das Messen des komplexen Übertragungsfaktors enthält, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Schritt zugleich das Messen des komplexen Reflexionsfaktors enthält.

4. Vorrichtung zur Ausführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass sie eine Mikrowellenquelle, einen Applikator, einen Mikrowellendetektor, Mittel zum Messen der Phasendrehung Φ und der Übertragungsdämpfung A_e der Mikrowellen von der Quelle über den Applikator zu dem Detektor, Mittel zum Ermitteln der Grösse A, die durch die untenstehende Formel gegeben ist:

$$A = \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} = \frac{\Phi_e^2 - \Phi_0^2}{A_e \Phi_e}$$

wobei Φ_0 die Phasendrehung ohne Messgut in der Messstrecke und Φ_e die Phasendrehung mit Messgut in der Messstrecke ist und A_e die Übertragungsdämpfung mit Messgut in der Messstrecke ist und Mittel enthält zum aus dem ermittel-

ten Wert A Ableiten der Feuchte ψ mittels einer Eichkurve $A(\psi)$.

5. Vorrichtung zur Ausführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass sie einen Mikrowellenresonator, Mittel zum Messen der Resonanzfrequenz f und des Qualitätsfaktors Q ohne Messgut in dem Resonator (f_0 beziehungsweise Q_0) und mit Messgut in dem Resonator (f_1 beziehungsweise Q_1), Mittel zum Ermitteln der Grösse A, die durch die nachfolgende Formel gegeben ist:

$$A = \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} = 2 \frac{(f_1 - f_0)/f_1}{(1/Q_1 - 1/Q_0)}$$

und Mittel enthält zum aus dem ermittelten Wert von A

15 Ableiten der Feuchte ψ mittels einer Eichkurve $A(\psi)$.

6. Vorrichtung nach Anspruch 4 oder 5 zur Ausführung des Verfahrens nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass sie eine Mikrowellenquelle, einen Applikator, insbesondere einen Koaxialleitungssystemapplikator, einen Mikrowellendetektor, Mittel zum Messen des komplexen Übertragungsfaktors S_{21} und des komplexen Reflexionsfaktors S_{11} der Mikrowellen von der Quelle durch das Messgut in dem Applikator zu dem Detektor und weiterhin Mittel enthält zum Ermitteln der Grösse A, die durch die untenstehende Formel gegeben ist

$$A = \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} = \frac{1 - \varepsilon_0 R_e}{\varepsilon_0 I_e}$$

30 wobei ε_0 die Dielektrizitätskonstante von Luft ist und R_e der Realteil und I_e der Imaginärteil der Mikrowellenimpedanz $Z = R_e + jI_e$ des Messgutes ist und wobei

$$35 \quad Z = R_e + jI_e = \frac{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}$$

und die Vorrichtung weiterhin Mittel enthält zum aus dem ermittelten Wert für A Ableiten der Feuchtigkeit ψ mittels einer Eichkurve $A(\psi)$.

7. Vorrichtung nach Anspruch 4 oder 5 zur Ausführung des Verfahrens nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass sie eine Mikrowellenquelle, eine Hohlleiterapplikator, einen Mikrowellendetektor, Mittel zum Messen des komplexen Transmissionsfaktors S_{21} und des komplexen Reflexionsfaktors S_{11} der Mikrowellen von der Quelle durch das Messgut in dem Applikator zu dem Detektor, und Mittel enthält zum Ermitteln der Grösse A, die durch die nachfolgende Formel gegeben ist:

$$50 \quad A = \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} = \frac{1 - (\lambda/\lambda_c)^2 - \varepsilon_0 R_e}{\varepsilon_0 I_e}$$

wobei ε_0 die Dielektrizitätskonstante von Luft ist, R_e der Realteil und I_e der Imaginärteil der komplexen Mikrowellenimpedanz $Z = R_e + jI_e$ des Messgutes in dem Applikator ist und wobei λ die Wellenlänge in dem Hohlleiter und λ_c die Grenzwellenlänge in dem Hohlleiter ist und wobei

$$60 \quad Z = R_e + jI_e = \frac{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}$$

und die Vorrichtung weiterhin Mittel enthält zum aus dem für A ermittelten Wert Ableiten der relativen Feuchte ψ mittels einer Eichkurve $A(\psi)$.

Verfahren und Vorrichtungen zum dichtenunabhängigen Messen der relativen Feuchte eines Messgutes mit Hilfe von Mikrowellen.

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum dichtenunabhängigen Messen der relativen Feuchte eines Messgutes mit Hilfe von Mikrowellen gemäss dem Oberbegriff der Patentansprüche 1 und 2.

An sich ist es möglich, den Feuchtigkeitsgehalt von Gütern durch Wägung zu ermitteln. Das zu messende Messgut wird nämlich in trockenem Zustand und in feuchtem Zustand gewogen. Der absolute Feuchtigkeitsgehalt entspricht dann der Differenz zwischen den beiden Wägungen. Die relative Feuchte (ψ) (in Prozent) ist gleich:

$$\psi[\%] = 100 m_w / m_w + m_d$$

wobei m_w die Masse der vorhandenen Wassermenge und m_d die Masse des Trockengutes darstellt. Ein derartiges Wägungsverfahren in einem kontinuierlichen Prozess ist jedoch äusserst zeitraubend und kostspielig, wodurch bereits lange Zeit auch andere Messverfahren verfügbar sind.

Im folgenden wird auf die nachstehenden Literaturstellen, Bezugsmaterial genannt, Bezug genommen:

(1) Hasted, J.B. «Aqueous Dielectrics», Chapman & Hall, London, S. 57, 238.

(2) Kraszewski, A. «Microwave instrumentation for moisture content measurement», Jnl. of Microw. Power, Heft 8, Nr. 3/4 1973, S. 323–335.

(3) Kalinski, J. «Einige Probleme der industriellen Feuchtigkeitsmessung mit Mikrowellen», Microwellenmagazin, Heft 6, 1978, S. 441–452.

(4) Kraszewski, A. und Kalinski, S. «An improved microwave method of moisture content measurement and control», IEEE Trans IECI, Heft 23, 1976, S. 364–370.

(5) Meyer, W. Schilz, W. «Microwave absorption by water in organic materials» in Dielectric materials, measurements and applications IEEE Conf. Publ. 177, London 1979, S. 215.

Aus beispielsweise Hasted (Bezugsmaterial [1]) ist bekannt, dass durch Messung der komplexen Mikrowellenimpedanz (Dämpfung und Phasendrehung) die komplexe Dielektrizitätskonstante ϵ des feuchten Messgutes ermittelt werden kann. Diese komplexe Dielektrizitätskonstante ist aufgrund der spezifischen Wassereigenschaften im Mikrowellenbereich ein Mass für die vorhandene absolute Wassermenge. Ein Instrument, das auf dieser Methode gründet, ist in dem Artikel von Kraszewski (Bezugsmaterial [2]) beschrieben worden. Durch eine einzelne Dichtemessung, beispielsweise durch Wägen, kann die relative Feuchte ψ ermittelt werden. Der obengenannte Nachteil gilt für die Messung der relativen Feuchte ψ also nach wie vor. Es ist auch bereits vorgeschlagen worden (Bezugsmaterial [3]) das Messgut bei konstanter Dichte und Temperatur in einer bestimmten Raumform zu messen und daraus eine Eichkurve für die relative Feuchte abzuleiten. Ein Nachteil ist, dass das Messgut immer in einer bestimmten Raumform verfügbar sein muss. In einem kontinuierlichen Messverfahren (Fließband) ist dies nachteilig, weil die Höhe des Messgutes (Getreide, Kaffee, Sand, Tabak) auf dem Fließband nicht konstant ist und folglich unmittelbar als Messfehler bei der Ermittlung der relativen Feuchte eingeführt wird.

Eine Methode der eingangs erwähnten Art zum dicken- und/oder dichtenunabhängigen Messen der relativen Feuchte ψ eines Messgutes ist aus dem Bezugsmaterial (e) bekannt. In diesem Artikel wird angegeben, dass, wenn das Messgut homogen ist und die Dämpfung und die Phasendrehung zu dem Gewicht des Wassers und zu dem Gewicht des trockenen Messgutes linear verlaufen, eine Formel abgeleitet werden kann für die relative Feuchte, die von der Dichte oder von der

Schütthöhe unabhängig ist. Ausser den genannten Beschränkungen, die an die Ableitung der Formel gestellt werden, ist die Abhängigkeit von der Schütthöhe teilweise geblieben, wie in dem genannten Artikel auf Seite 368 in Fig. 6 und Fig. 7 beschrieben wird. Es stellt sich heraus, dass die gemachten Fehler von dem Feuchtigkeitsgehalt abhängig und daher äusserst störend sind.

Die Erfindung hat nun zur Aufgabe, ein Verfahren der eingangs erwähnten Art zu schaffen zum dichtenunabhängigen Messen der relativen Feuchte ψ eines Messgutes mit Hilfe von Mikrowellen, mit dem auf einfache und genaue Art und Weise ein Messgut unabhängig von der Dichte gemessen wird.

Das erfindungsgemässe Verfahren weist dazu die Merkmale gemäss dem kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 bzw. des Patentanspruchs 2 auf.

Die Erfindung hat weiterhin zur Aufgabe, Vorrichtungen zur Ausführung der genannten Verfahren zu schaffen. Erfindungsgemäss weisen die Vorrichtungen die in den Patentansprüchen 4 bzw. 5 angeführten Merkmale auf.

An Hand der Zeichnungen werden nun die Ausführungsbeispiele der Erfindung und ihre Vorteile näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine Anzahl Applikatoren, die zum Messen des Messgutes nach der Erfindung benutzt werden,

Fig. 2 die dichtenunabhängigen Eichkurven $A(\psi)$ für Getreide (ω) und Tabak (t) für eine Frequenz von 12,50 GHz zum Gebrauch entsprechend der Erfindung,

Fig. 3 eine Eichkurve $A(\psi)$ für Tabak mit einer konstanten Dichte von $\rho = 0,26 \text{ g/cm}^3$,

Fig. 4 einige Messpunkte für Tabak mit einem zu ermittelnden Feuchtigkeitsgehalt bei unterschiedlichen Dichten ρ ;

Fig. 5 die Eichkurven $A(\psi)$, die zu den Applikatoren gehören, die in Fig. 1 dargestellt sind zur Ermittlung der relativen Feuchte ψ aus dem gemessenen Wert von A entsprechend der Erfindung;

Fig. 6 den Verlauf von $\tan \delta$ für Wolle als Funktion der Messfrequenz bei einigen Feuchtigkeitsgeräten;

Fig. 7 den aus Fig. 6 abgeleiteten Verlauf von $\tan \delta$ als Funktion der relativen Feuchte;

Fig. 8 den Verlauf von ϵ' , ϵ'' und A als Funktion der Dichte ρ ;

Fig. 9 ein Blockschaltbild eines Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Erfindung;

Fig. 10 ein Ausführungsbeispiel eines Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Erfindung;

Fig. 11 einen Applikator zum Messen der Feuchtigkeit von Tabak in Zigaretten.

Das Prinzip der Mikrowellenfeuchtigkeitsmessung gründet auf der Tatsache, dass bei Mikrowellenfrequenzen die komplexe Dielektrizitätskonstante von Wasser ($\epsilon = 63 - j31$ bei 9 GHz) von der vieler trockener Massen beziehungsweise Stoffe wesentlich abweicht. Dadurch hängt das dielektrische Verhalten feuchter Massen beziehungsweise Stoffe weitgehend von dem Feuchtigkeitsgehalt ab, was in dem Wert der Real- und des Imaginärteils der dielektrische Konstante $\epsilon = \epsilon'(\epsilon' - j\epsilon'')$ zum Ausdruck gelangt.

Für eine grosse Skala praktisch wichtiger Stoffe (Tabak, Tee, Getreide) hat es sich herausgestellt, dass das Verhältnis von $\epsilon'(\psi, \rho) - 1$ und $\epsilon''(\psi, \rho)$ für nicht allzu hohe Feuchtigkeitsgehalte von der Dichte ρ unabhängig ist. Dies bedeutet, dass dadurch, dass in dem Ausdruck

$$A(\psi) = \frac{\epsilon'(\psi, \rho) - 1}{\epsilon''(\psi, \rho)} \quad (1)$$

ϵ' und ϵ'' simultan ermittelt und das Messinstrument in Termen von $A(\psi)$ geeicht wird, unabhängig von der Dichte ρ ,

die relative Feuchte ψ ermittelt werden kann. Dieses Verfahren ist nicht nur bei Stoffen anwendbar, deren Phase und Dämpfung zu dem Wassergehalt und der Dichte der Trockensubstanz sich linear ändern, wie im Bezugsmaterial D(4) vorausgesetzt wird, sondern gilt im allgemeinen bei Proportionalität des Zählers und Nenners der Gleichung (1).

Für gewisse Stoffe, beispielsweise Wolle, beschreibt die Gleichung (1) die experimentellen Ergebnisse jedoch unzureichend. In diesen Fällen ist ein modifizierter Ausdruck $A^*(\psi)$ besser:

$$A^*(\psi) = \frac{\epsilon'(\psi, \rho) - 1}{\tan \delta} \quad (2)$$

Im Grunde ist es nicht möglich, bei einer bestimmten Messfrequenz ohne Kenntnisse der Abmessungen des Messgutes den Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätskonstanten, wie obenstehend in der Gleichung (1) angegeben, absolut und gleichzeitig zu ermitteln. Es kann jedoch, wie nachstehend noch beschrieben wird, ein Ausdruck A längenunabhängig ermittelt werden, der ϵ' und ϵ'' enthält und derart gewählt werden kann, dass A ausserdem noch von der Dichte des zu untersuchenden Messgutes unabhängig ist.

1. Leitungen (u.a. Mikrostreifen), Wellenleiter, freier Raum, beispielsweise zwischen zwei Hornstrahlern.

Die Probe mit der unbekannten Länge (beziehungsweise Höhe, Dicke) L ist im Leitungsapplikator enthalten, der aus einem Stück Koaxialleitung, aus einem Hohlleiter oder auch als der freie Raum zwischen zwei Hornstrahlern ausgeführt sein kann. Für das Verhältnis des Wellenwiderstandes des probenfreien Übertragungsraumes Z_0 zur komplexen Probenimpedanz Z_e ergibt sich dann:

$$(Z_0/Z_e)^2 = \frac{(1 - S_{11})^2 S_{21}^2}{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2} = R_e + jI_e \quad (3)$$

S_{11} ist der komplexe Reflexionsfaktor, S_{21} ist der komplexe Transmissionsfaktor. Mit den Wellenwiderständen für ebene Wellen:

$$Z_e = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon} \epsilon_0 \mu_0} \quad (4)$$

und für koaxiale TEM-Wellen gilt:

$$Z_e = \frac{60}{\sqrt{\epsilon} \epsilon_0 \mu_0} \ln r_0/r_i \quad (5)$$

r_0 ist der Radius des Aussenleiters und r_i ist der Radius des Innenleiters. Dann ergibt sich für koaxiale TEM-Wellen:

$$A = \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''} = \frac{1 - \epsilon_0 R_e}{\epsilon_0 I_e} \quad (6)$$

wobei R_e und I_e durch die Gleichung (3) gegeben sind. Für Hohlleiter von dem H-Typ gilt:

$$Z_e = \frac{120\pi}{\sqrt{(\epsilon \mu_0 - (\lambda/\lambda_c)^2)}} \quad (7)$$

Hierbei ist λ_c die Grenzwellenlänge und λ die Betriebswellenlänge in dem Hohlleiter. Daraus folgt:

$$A = \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''} = \frac{1 - (\lambda/\lambda_c)^2 - \lambda_0 R_e}{\epsilon_0 I_e} \quad (8)$$

Ähnliche Formeln lassen sich auch für nur teilweise gefüllte Leitungen, planare sowie Oberflächenwellenleiter

angeben. Die Gleichungen (6) und (8) gelten auch bei sehr langen, d.h. unendlich ausgedehnten Proben, bei denen keine Transmission festgestellt werden kann und die Definition einer Länge sinnlos wäre. Im Messwert für A nach der Gleichung (3) nimmt S_{21} dann den Wert null an.

Für den Spezialfall einer verlustarmen Probe des Messgutes mit einer niedrigen Dielektrizitätskonstante $\epsilon' \approx \epsilon_0$ wird die Anwendung der Gleichung (3) zu ungenau für praktische Messungen. Auch in diesem Fall lässt sich eine Probenlänge durch eine geeignete Kombination der gemessenen Phase:

$$\Phi \epsilon = \rho \epsilon' [\text{rad}] \quad (9)$$

und der Dämpfung

$$A_E = \alpha_e l [N_p] \quad (10)$$

eliminieren. Mit

$$\beta_e \cdot l = \sqrt{(\omega/c_0)^2 \epsilon' - k_c^2} \cdot l, k_c = 2\pi/\lambda_c; \quad (11)$$

$$\alpha_e \cdot l = \frac{(\omega/c_0)^2 \epsilon''}{2\beta_e \cdot l} \cdot l^2, \omega = 2\pi f; \quad (12)$$

$$\Phi_0 = \beta_0 l = \sqrt{(\omega/c_0)^2 \epsilon_0 - k_c^2} \cdot l;$$

ergibt sich für:

$$A(\psi) = \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''} = \frac{\Phi^2 \epsilon - \Phi_0^2}{A_e \Phi_e} \quad (13)$$

2. Resonatoren

Die Frequenz- und Güteänderung eines Resonators beim Einführen eines kleinen verlustbehafteten Dielektrikums berechnet sich mit Hilfe der Störungstheorie zu:

$$\frac{f_1 - f_0}{f_1} + \frac{j}{2} (1/Q_1 - 1/Q_0) = \frac{\int V_{e,0} \tilde{E}_0 \tilde{E}_1 dV_e}{\int V_e (\epsilon_0 \tilde{E}_0 \tilde{E}_1 + \mu_0 \tilde{H}_0 \tilde{H}_1) dV_e} \quad (14)$$

Der Index 0 bezieht sich auf Felder E , H , die Frequenz f , die Güte Q , DK des Resonators ohne Messgut, der Index 1 auf den teilweise gefüllten Resonator. Der Integralausdruck ist bei kleinen Störungen reell. Für A ergibt sich dann:

$$A = \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''} = 2 \frac{(f_1 - f_0)/f_1}{(1/Q_1 - 1/Q_0)} \quad (15)$$

wobei:

- Q_0 die Qualität des Resonators ohne Messgut;
- Q_1 die Qualität des Resonators mit dem Messgut;
- f_0 die Resonanzfrequenz des leeren Resonators;
- f_1 die Resonanzfrequenz des gefüllten Resonators ist.

In einer praktischen Ausführungsform eines dichtenunabhängigen Mikrowellenfeuchtigkeitsmessgerätes besteht dieses Gerät hauptsächlich aus dem Applikator und dem sogenannten Mikrowellenetzwerk, in dem beispielsweise durch Messung des ausgestrahlten und reflektierten Signals die komplexe Impedanz des Messgutes aus dem elektrischen Signal abgeleitet wird und dieses Gerät besteht weiterhin aus dem Signalverarbeitungsteil mit einer Anzeige, wobei aus den

Messsignalen der dichtenunabhängige Ausdruck aus den Gleichungen (1) und (2) gebildet wird, beispielsweise mit Hilfe eines Mikroprozessors und mit der aus Labormessungen bekannten Eichkurve $A(\psi)$ des betreffenden Messgutes verglichen wird.

In Fig. 1 ist eine Anzahl Applikatoren dargestellt.

In Fig. 1a ist ein sogenannter «inverted image»-Leiter mit zwei Wellenleiteranschlüssen 3 dargestellt. Durch 1 ist die aus einem verlustarmen Dielektrikum mit einer ziemlichen hohen DK ($\epsilon \approx 6$, beispielsweise Stycast) bestehende Wellenleitung bezeichnet, die in dem Medium 2 mit $\epsilon \gg 6$ verläuft. Das Schüttgut läuft in Richtung des Pfeiles 4 über die Fläche und ändert die Leitungseigenschaften, die durch Reflexions- und Übertragungsfaktoren gemessen werden.

In Fig. 1b ist ein Applikator dargestellt, der zwei zueinander gerichtete Hornstrahler 5 und 6 enthält. Zwischen den beiden Hornstrahlern gibt es einen Raum 7, in dem eine flache EM-Welle erzeugt wird. Das Messgut wird in den Raum 7 gegeben.

In Fig. 1c ist ein Mikrostreifenapplikator dargestellt. Auf einer dielektrischen Platte 8 ist ein leitender Streifen 9 vorgesehen, der ein dem Eingang 10 zugeführtes Signal zu dem Ausgang 11 führt. Weil das Feld, das von diesem Signal erzeugt wird, sich auch über der dielektrischen Platte 8 befindet, wird der Einfluss des darauf anzubringenden Messgutes auf die Mikrowellenleitereigenschaften ermittelt.

In Fig. 2 sind für zwei Stoffe (Getreide und Tabak) die Eichkurven $A(\psi)$ dargestellt, wie diese bei 12,5 GHz bei konstanter Temperatur gemessen wurden. Die Eichkurve $A(\psi)$ ist, wie bereits erwähnt, dichtenunabhängig. Zur Erläuterung des Ausmasses, in dem die Eichkurve $A(\psi)$ dichtenunabhängig ist, ist in Fig. 3 eine Eichkurve $A(\psi)$ dargestellt, die bei konstanter Dichte $\rho = 0,26 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ für Tabak bei unterschiedlichen Feuchtigkeitsgraden gemessen wurde. In Fig. 4 sind zum Vergleich damit für Tabak mit einem unbekannten Feuchtigkeitsgrad eine Anzahl Messpunkte dargestellt von $A(\psi)$ für unterschiedliche Dichten ρ . Es stellt sich heraus, dass der mittlere Wert von A bei 21 liegt und die Streuung ± 1 ist. Aus einem Vergleich dieses Ergebnisses mit der in Fig. 3 dargestellten Eichkurve stellt es sich heraus, dass die Feuchtigkeit 4% beträgt und dass, dichteunabhängig gemessen, ein absoluter Messfehler eingeführt wird, der zwischen $-0,4\%$ und $+0,2\%$ liegt.

In Fig. 5 sind die Eichkurven $A(\psi)$, die zu den Applikatoren nach Fig. 1 gehören, dargestellt. Die Eichkurven $A(\psi)$ sind also, wie aus Fig. 2 und Fig. 5 hervorgeht, spezifisch für die Art des Messgutes und die mechanisch-elektrischen Eigenschaften des verwendeten Applikators.

Die Wahl der Mikrowellenfrequenz f , bei der die Feuchte des Messgutes bestimmt wird, ist nicht ohne Bedeutung. In Fig. 6 ist für Wolle der Verlauf von $\tan\delta$ dargestellt als Funktion der Messfrequenz für eine Anzahl Werte der relativen Feuchte ψ . Die gestrichelte Linie zeigt den Verlauf von $\tan\delta$ als Funktion von f für trockenes Messgut ($\psi = 0$). Die gezogenen Linien zeigen den Verlauf von $\tan\delta$ als Funktion von f für Messgut mit einer relativen Feuchte ψ von 5, 9, 14, 23, beziehungsweise 26%. Für Wolle stellt es sich also heraus, dass eine sehr hohe Messfrequenz $f = 15 \text{ GHz}$ gewählt werden muss, um eine möglichst grosse Messempfindlichkeit zu erhalten. Die Empfindlichkeit in dem Niederfrequenzgebiet ist noch grösser, wie dies aus Fig. 6 hervorgeht. Aber das Messen bei niedrigen Frequenzen weist den Nachteil auf, dass das Messverfahren dann für Ionenleitung empfindlich ist, während über etwa 10 GHz dieser Einfluss fast ohne Bedeutung ist, wie aus dem Bezugsmaterial (5) und (1) hervorgeht.

Wählt man zur Messung von Wolle die Messfrequenz 15 GHz, so zeigt Fig. 7 den nach Fig. 6 erhaltenen Verlauf von

$\tan\delta$ als Funktion der relativen Feuchte.

Aus vielen Messungen organischer Stoffe wie Federn, Tabak und Wolle geht sogar hervor, dass der Verlauf sowohl von $\epsilon'(\psi, \rho)$ (und folglich auch $\epsilon'(\psi, \rho) - 1$) als auch von $\epsilon''(\psi, \rho)$ von der Dichte nahezu linear abhängig ist. Die Anforderung, die bei der Ableitung der Formel (1) gestellt wurde, ist dann durchaus erfüllt. Fig. 8a zeigt den Verlauf von $\epsilon''(\psi, \rho)$ als Funktion der Dichte ρ , Fig. 8b zeigt den Verlauf von $\epsilon'(\psi, \rho)$ als Funktion von ρ und der daraus berechnete Wert von A nach der Formel (1) ist in Fig. 8c dargestellt. Der gemessene Bereich der Dichte im Trockenzustand der Wolle liegt zwischen $0,025 \text{ g/cm}^3$ bis $0,2 \text{ g/cm}^3$.

Das Feuchtigkeitsmessgerät nach Fig. 9 enthält einen Formgeber 12, einen doppelten Hornstrahlerapplikator 13, ein Mikrowellennetzwerk 14, das u.a. Oszillatoren, Mischstufen und Detektoren enthält, eine Signalverarbeitungseinheit 15, die beispielsweise entsprechend der Formel (13) dichtenunabhängig den Wert A ermittelt, mit dem über die beispielsweise in einer Speichertabelle gespeicherte Eichkurve $A(\psi)$ die relative Feuchte ermittelt und an der Anzeige 16 wiedergegeben wird. In dieser Messanordnung kann ausser dem Hornapplikator auch ein anderer Applikator benutzt werden, beispielsweise der in Fig. 1a oder Fig. 1c dargestellte Applikator.

In Fig. 10 ist ein Ausführungsbeispiel eines Mikrowellenmessgerätes dargestellt. Es lassen sich drei Frequenzhierarchien unterscheiden: (a) der eigentliche Mikrowellenteil (etwa 9 GHz) durch eine gestrichelte Linie angegeben, (b) ein ZF-Teil (etwa 10 MHz) durch eine gezogene Linie angegeben und einen NF-Signalverarbeitungsteil (etwa 10 kHz) durch eine gestrichelte Linie angegeben.

Der eigentliche Mikrowellenteil enthält einen ersten Oszillator 17 und einen zweiten Oszillator 18, beispielsweise als Gunn-Oszillator ausgebildet, welche Oszillatoren bei etwa 9 GHz in einem konstanten Frequenzabstand von 10 MHz gehalten werden, und zwar durch eine quarzstabilisierte phasenverriegelte Schleife. Das Signal des ersten Oszillators 17 wird dem Applikator 19 zugeführt, in dem oder auf dem sich das Messgut befindet. Das Signal an dem Ausgang des Applikators wird einer ersten Mischstufe 20 zugeführt, wo dieses Signal mit dem von dem zweiten Oszillator 18 herrührenden um 10 MHz in der Frequenz verschobenen Signal gemischt wird. Eine zweite HF-Mischstufe 21 wird dazu benutzt, an einem Ausgang 22 einerseits ein 10-MHz-Regelsignal zu erzeugen für die phasenverriegelte Schleife und andererseits ein Signal zu erzeugen, das ein Mass für die Dämpfung und die Phasendrehung des Mikrowellensignals in dem Applikator ohne Messgut ist.

Der ZF-Teil enthält die phasenverriegelte Schleife 23, die an einen ersten Bezugsozillator 24 (Frequenz 10 MHz) angeschlossen ist und an über einen Verstärker 24 an dem Ausgang 22 der Mischstufe 21 zugeführt wird. Ein Ausgang der phasenverriegelten Schleife 23 ist an einen Steuereingang 25 des spannungsgesteuerten Oszillators 18 angeschlossen. Der ZF-Teil enthält weiterhin einen zweiten Bezugsozillator 26 (Frequenz 9,99 MHz), der an einen ersten Eingang 27 einer weiteren Mischstufe 28 angeschlossen ist. Einem zweiten Eingang 29 der Mischstufe 28 wird das von der Mischstufe 20 gelieferte Ausgangssignal zugeführt. An einem Ausgang 30 der Mischstufe 28 ist dann ein 10-kHz-Signal verfügbar. Der zweite Bezugsozillator 26 ist weiterhin an einen ersten Eingang 31 einer weiteren Mischstufe 32 angeschlossen. Einem zweiten Eingang 33 der Mischstufe 32 wird das von der Mischstufe 21 gelieferte Ausgangssignal zugeführt. An einem Ausgang 34 der Mischstufe 32 ist dann ebenfalls ein 10-kHz-Signal verfügbar.

Der NF-Teil enthält 10-kHz-Bandpassfilter 35 und 36, die an die Mischstufe 28 beziehungsweise 32 angeschlossen sind.

Die Ausgangssignale der beiden Filter 28, 32 werden der Amplitudendifferenzanordnung 37 zur Ermittlung der Dämpfung A_t , die durch das Messgut in dem Applikator verursacht wurde, zugeführt. Die Ausgangssignale der beiden Filter 28 und 32 werden über Wandler 38 beziehungsweise 39 der Phasendifferenzanordnung 40 zur Ermittlung der Phasendifferenz Φ_t , die durch das Messgut in dem Applikator verursacht wird, zugeführt. Die beiden Differenzanordnungen sind an eine Verarbeitungseinheit 41, beispielsweise einen Mikroprozessor, angeschlossen, der aus dem Quotienten von Φ_t und A_t den Wert A berechnet (entsprechend der Formel [13]) und

daraufhin mit Hilfe der in einem Speicher gespeicherten Information in bezug auf die Eichkurve die relative Feuchte ψ ermittelt.

Fig. 11 zeigt eine Messvorrichtung in Form eines Wendelresonators (Applikator) zur Aufnahme von Zigaretten und zur Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften von Tabak, bestehend aus einem Quarzrohr 42 zur Aufnahme der Zigaretten 43, einer Metallwendel 44 zur Einstellung der Resonanzfrequenz, einer HF-Kopplung 45 und einer Abschirmung 46. Nach dem Einführen der Zigaretten ergeben sich die Messwerte $A(\psi)$ nach der Gleichung (15).

1/5

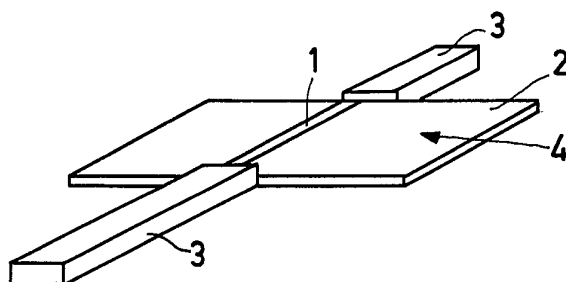


FIG. 1a

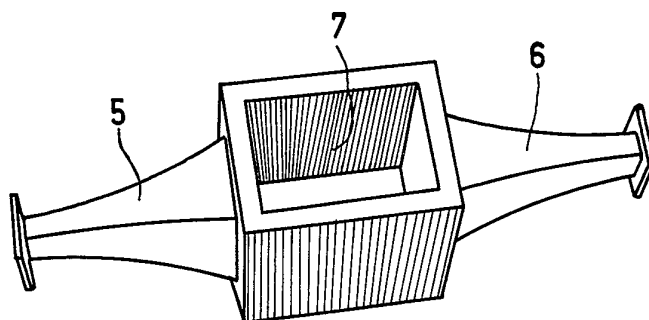


FIG. 1b

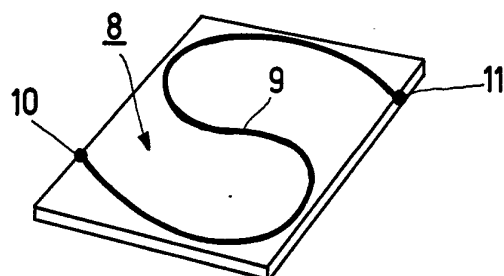


FIG. 1c

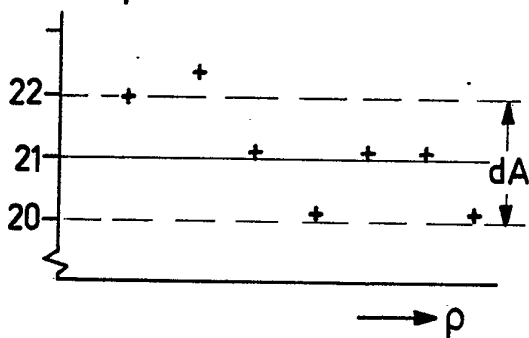
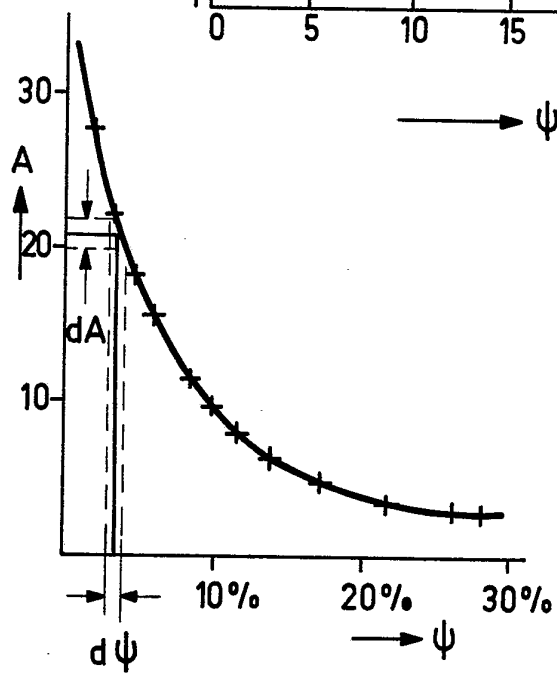
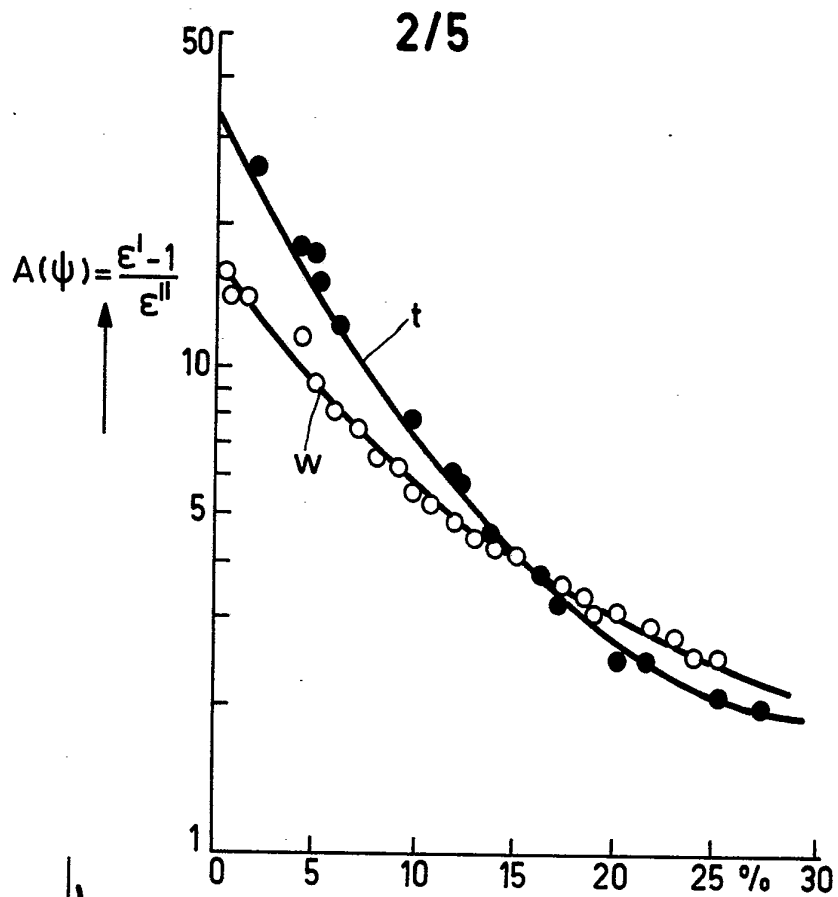


FIG.2

FIG.3

FIG.4

3/5

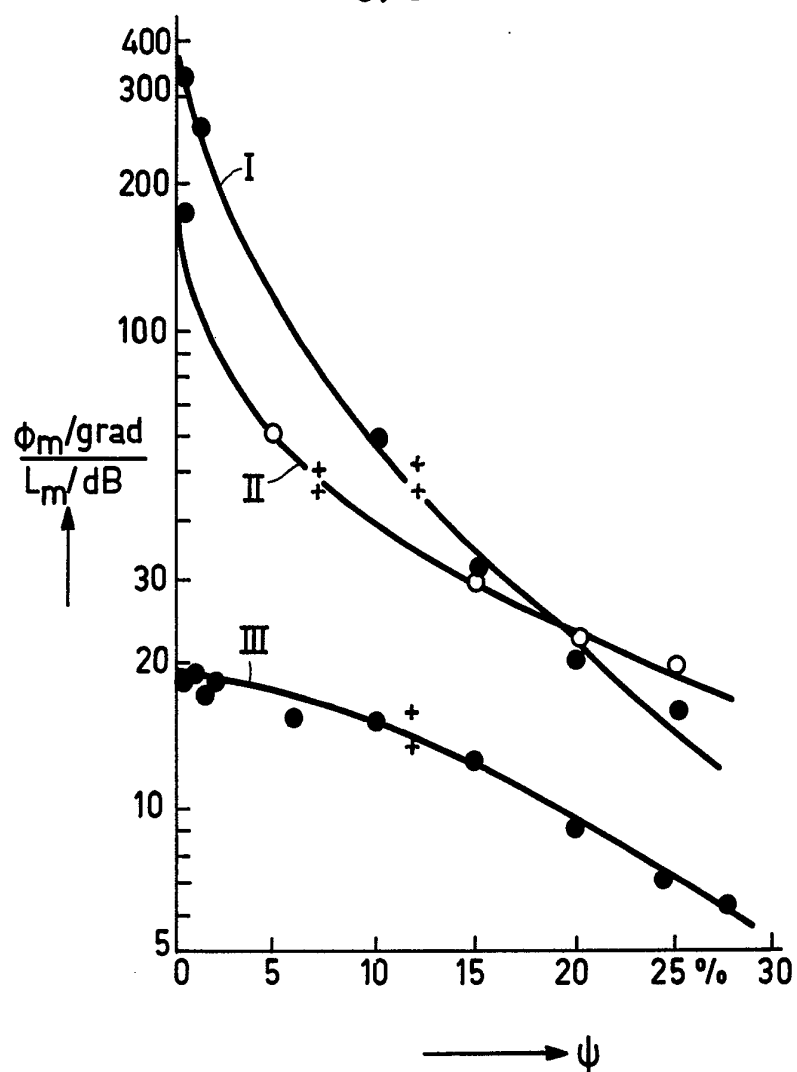


FIG. 5

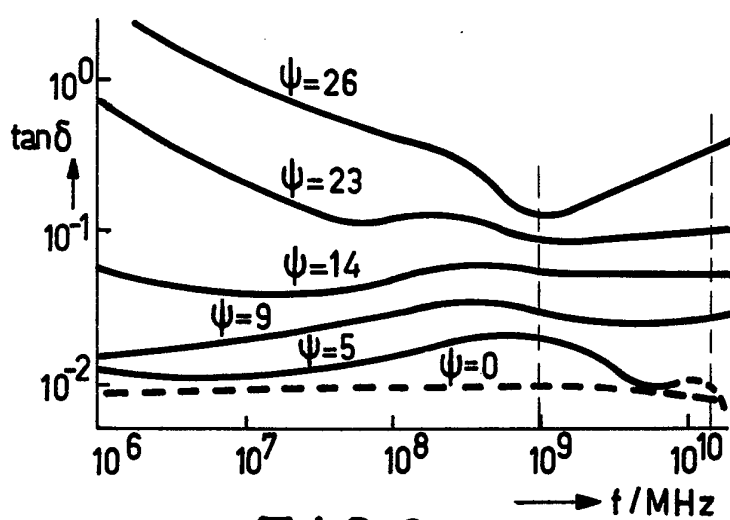


FIG. 6

4/5

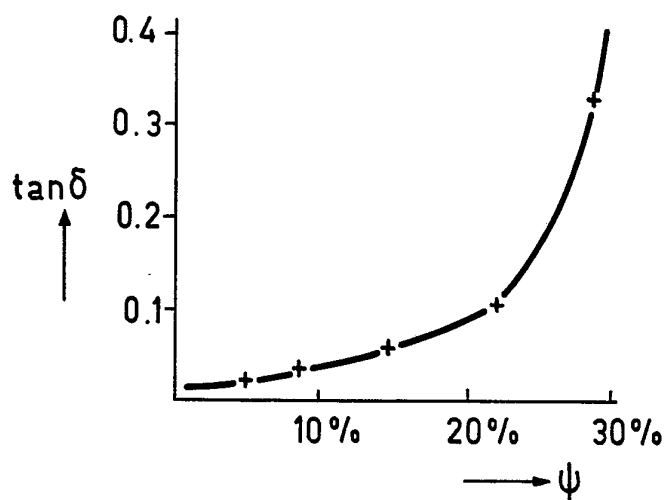


FIG.7

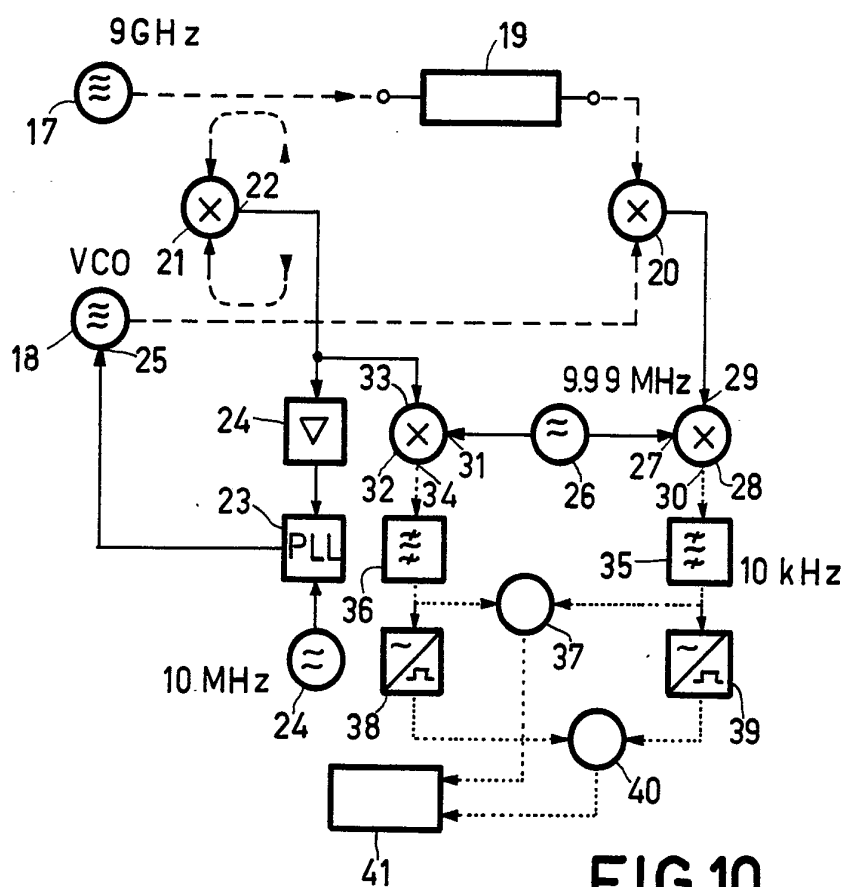


FIG.10

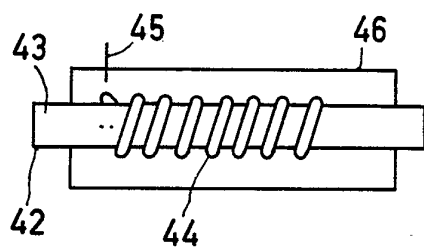


FIG.11

5/5

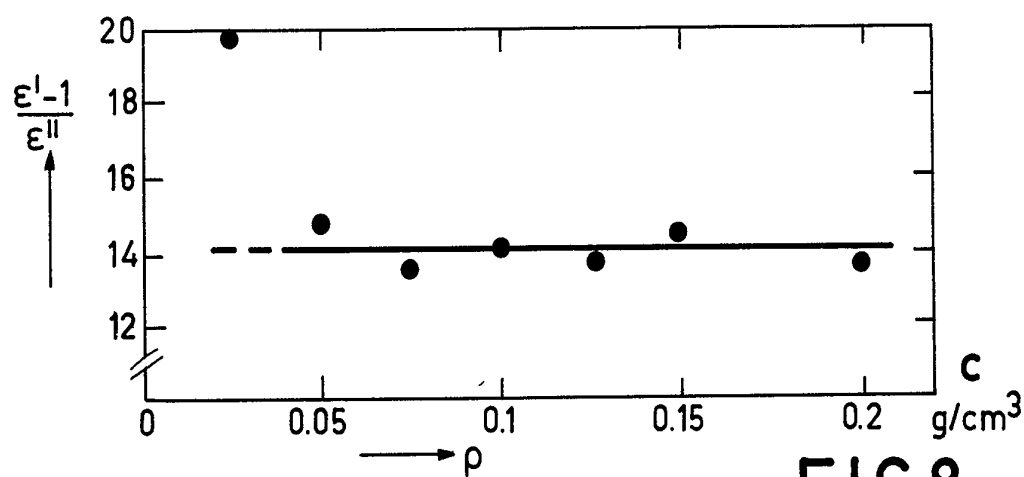
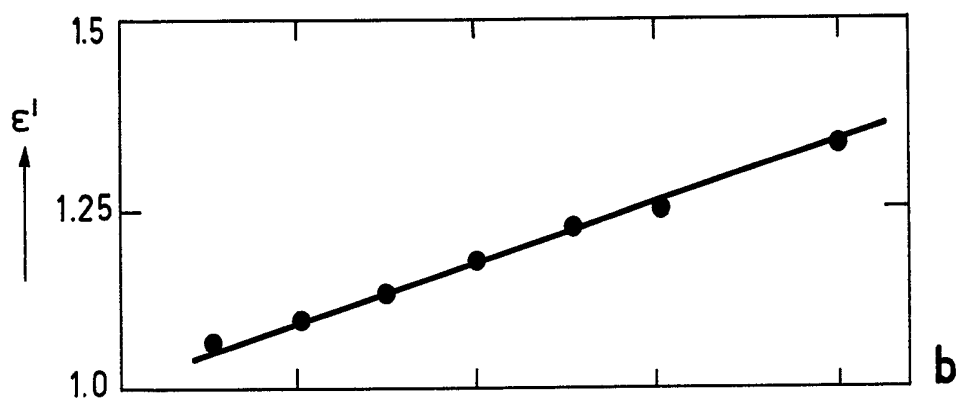
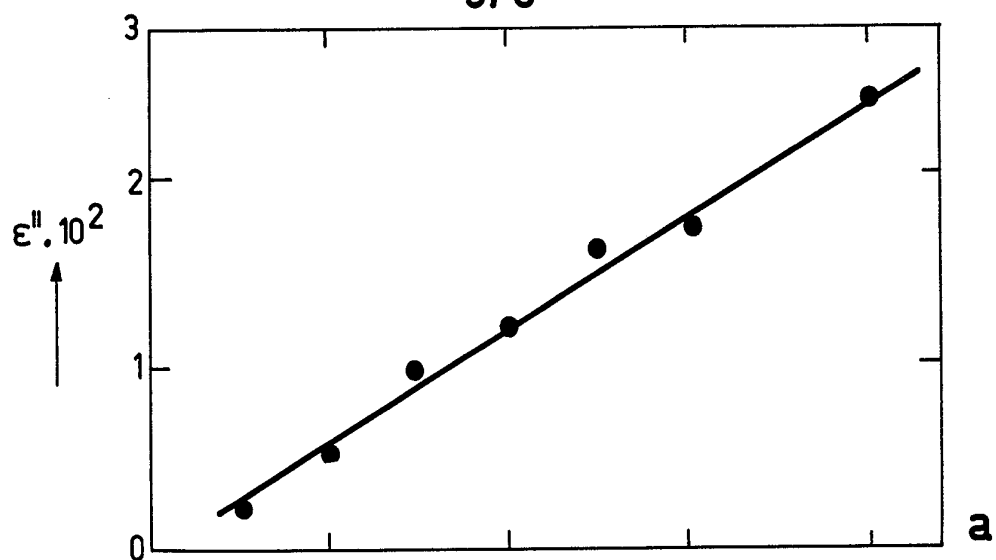


FIG.8

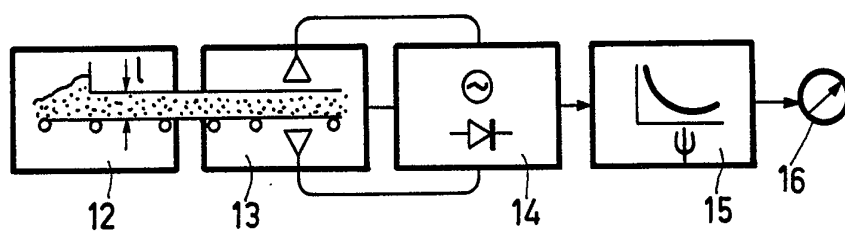


FIG.9