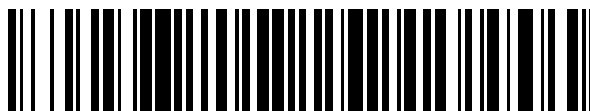


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 548 013**

51 Int. Cl.:

G01N 22/00 (2006.01)

G01N 22/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.07.2008** **E 08785055 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.07.2015** **EP 2183577**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para medir un valor de humedad independiente de la densidad y un valor de densidad de materiales dieléctricos a partir de los desplazamientos de frecuencia de dos resonadores de microondas o de dos modos de un resonador de microondas**

30 Prioridad:

28.08.2007 DE 102007041429

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

13.10.2015

73 Titular/es:

**TEWS ELEKTRONIK DIPL.-ING. MANFRED TEWS
(100.0%)
SPERBERHORST 10
22459 HAMBURG, DE**

72 Inventor/es:

**HERRMANN, RAINER;
SCHLEMM, UDO y
RICHTER, HENDRIK**

74 Agente/Representante:

ROEB DÍAZ-ÁLVAREZ, María

ES 2 548 013 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo para medir un valor de humedad independiente de la densidad y un valor de densidad de materiales dieléctricos a partir de los desplazamientos de frecuencia de dos resonadores de microondas o de dos modos de un resonador de microondas.

La presente invención se refiere a un procedimiento para medir un valor de humedad de materiales dieléctricos mediante la utilización de al menos un resonador de microondas. La presente invención es adecuada en particular también para procesos de granulación, aglomeración, instantaneización, recubrimiento y secado en un lecho fluidizado o un material a granel móvil.

En general es conocida la utilización de la técnica de microondas para determinar la masa y/o la humedad. Por el documento DE4004119C2 es conocido cómo se impide la influencia de variaciones de densidad/masa sobre una señal de humedad al realizarse una medición con una resonancia de microondas. A tal efecto, la variación en la atenuación de la señal, como se indica, por ejemplo, mediante la variación de la anchura de resonancia o la amplitud de resonancia, se normaliza al desplazamiento de la frecuencia de resonancia. Por tanto, la señal de atenuación se normaliza a un estado de densidad que genera siempre un desplazamiento de la frecuencia de resonancia proporcional a la densidad. Este enfoque de dos parámetros, en el que, además de un desplazamiento de la frecuencia de resonancia, se mide también la atenuación producida, permite una medición precisa de la humedad de manera independiente de la densidad. En particular, en caso de aplicarse en secadores de lecho fluidizado, el procedimiento de medición de dos parámetros permite distinguir de manera precisa las diferentes influencias sobre los resultados de medición. En particular, las influencias del grado de granulación diferente se pueden distinguir claramente de las influencias de la granulación.

El documento EP0970369 describe una medición de humedad en el intervalo de alta frecuencia en un lecho fluidizado o un material a granel móvil con la atenuación de un modo de resonancia para determinar la humedad. En este caso no se mide directamente la distribución del tamaño de grano. Más bien se asume que la humedad total del producto es una medida directa de la distribución del tamaño de grano y, por tanto, al conocerse la humedad, se conoce también la distribución del tamaño del grano. Dado que la atenuación medida de la señal de microondas depende siempre, por una parte, de la cantidad de material en el campo de medición y, por la otra parte, de su contenido de humedad, no es posible compensar la influencia de una variación de masa o densidad del material de medición sobre la señal de humedad al medirse sólo la atenuación. Por tanto, el procedimiento se puede utilizar sólo en procesos de lecho fluidizado y en materiales a granel móviles, en los que no resulta necesaria tal compensación de densidad.

Por el documento DE19645923A1 es conocido un cabezal de medición óptico para el análisis online de la humedad y/o del tamaño de partícula de partículas aglomeradas en granuladores o secadores.

Por el documento DE3739538A1 es conocido un dispositivo para la medición continua de humedad en lechos fluidizados. A este respecto se realiza una medición capacitiva en dos cilindros concéntricos, cuyos ejes de cilindro están dispuestos aproximadamente en paralelo al flujo de sólidos. El contenido de humedad se determina por medio de una variación de la capacidad. Dado que en el procedimiento de medición capacitiva, las señales de medición dependen del contenido de minerales del material de medición, no es posible distinguir entre humedad y densidad (o masa/tamaño de grano) en este procedimiento.

Por el documento DE3241544A1 es conocido un procedimiento para supervisar y/o controlar los procesos de secado, granulación, instantaneización, formación de grageas y recubrimiento de película. En este caso se mide la humedad del aire de salida, así como la humedad del aire de entrada y la diferencia de humedad resultante se utiliza para controlar el proceso de trabajo.

En el artículo de Lakshminarayana et al.: "Simple microwave technique for independent measurement of sample size and dielectric constant with results for a gunn oscillator system" de la publicación IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, volumen MTT-27 de julio de 1979, No. 7, páginas 661 a 665, se describe para un caso ideal la determinación de la parte real de la constante dieléctrica. A tal efecto, en un resonador rectangular o en un resonador cilíndrico se mide un producto en forma de hilo y se supone que debido al producto se producen pequeñas perturbaciones en el resonador, que se pueden calcular con ayuda de las aproximaciones de la teoría de perturbaciones. La ecuación (6) para el resonador rectangular y la ecuación (7) para el resonador cilíndrico permiten determinar la parte real de la constante dieléctrica al utilizarse los modos TE y TH. La parte real de la constante dieléctrica depende de la densidad del hilo y de su valor de humedad. El enfoque de la teoría de perturbaciones se

encuentra también en el documento US4,257,001.

- Ebbe Nyfors y Pertti Vainikainen: "Industrial microwave sensors", páginas 69 a 108, se basan en una técnica de medición ortogonal que se puede aplicar en materiales finos y planiformes. En caso de perturbaciones pequeñas, la parte real de la constante dieléctrica se puede determinar a partir del cociente de la desintonización de la frecuencia de resonancia de dos modos ortogonales (véase la primera fórmula en la página 85). La parte real de las constantes dieléctricas depende tanto de la densidad como de la humedad del material y no permite distinguir entre medición de densidad y de humedad.
- 10 En el artículo "Microwave moisture measurement systems and their applications", Kupfer describe un procedimiento de medición en las páginas 367 a 370, en el que se mide el producto con un modo. El segundo modo, que sirve como modo de referencia, no interactúa con el producto, porque el producto se guía a través de un nodo de oscilación. El modo de referencia sirve sólo para la compensación térmica y la detección de suciedad en el sensor. Se mantiene un procedimiento de un parámetro que no es capaz de ejecutar una medición separada de humedad y densidad en el producto. A tal efecto, se mide adicionalmente la atenuación de un emisor de rayos gamma.

Por el subcapítulo 7.4.8 del artículo "Method of density-independent moisture measurement" de Kupfer es conocido medir el desfase en el producto en caso de dos frecuencias diferentes de la propagación de ondas en el espacio libre y compensar la variación de las masas del producto en el campo de medición a partir del cociente de los dos desfases. En principio, el comportamiento de las microondas en el espacio libre es distinto al de las ondas estacionarias, véase al respecto el documento DE102007057092B4.

La invención tiene el objetivo de proporcionar un procedimiento que facilite resultados muy exactos con medios simples y permita compensar variaciones de masa o densidad del material de medición en particular en caso de aplicarse en materiales a granel móviles o en lechos fluidizados.

El objetivo anterior se consigue mediante un procedimiento con las características de la reivindicación 1. Configuraciones preferidas constituyen los objetos de las reivindicaciones secundarias.

- 30 El procedimiento, según la invención, sirve para medir un valor de humedad en materiales dieléctricos mediante la utilización de al menos un resonador de microondas. En el procedimiento se evalúa respectivamente un desplazamiento de la frecuencia de resonancia para al menos dos modos de resonancia con frecuencias de resonancia distintas entre sí y se calcula un valor de humedad independiente de la densidad a partir de los desplazamientos medidos de las frecuencias de resonancia. La ventaja particular de este procedimiento radica en que no es necesario recurrir por más tiempo a un valor de atenuación como medida de la humedad al determinarse el valor de humedad. Más bien, a partir de al menos dos desplazamientos de las frecuencias de resonancia, que se originan en presencia de frecuencias de resonancia diferentes, se calcula con gran fiabilidad un valor de humedad independiente de la densidad. El desplazamiento de la frecuencia de resonancia resulta de la diferencia de la frecuencia de resonancia generada en el resonador vacío y de la frecuencia de resonancia generada en el resonador lleno. En el procedimiento según la invención, el valor de humedad independiente de la densidad se determina, por ejemplo, mediante una curva de calibración de humedad que indica el valor de humedad en dependencia de al menos dos desplazamientos de la frecuencia de resonancia.

Según la invención se miden más de dos desplazamientos de la frecuencia de resonancia. Los valores de medición para el desplazamiento de la frecuencia de resonancia se adaptan a una curva de dispersión $A(f)$. La curva de dispersión describe en dependencia de la frecuencia la transición de un desplazamiento de la frecuencia de resonancia a una baja frecuencia a un desplazamiento de la frecuencia de resonancia a una alta frecuencia. La fórmula para la curva de dispersión es:

$$A(f) = A_1 + \frac{A_2}{1 + (2\pi f \tau)^2}$$

donde A_1 , A_2 y τ son constantes de valor real que se adaptan de acuerdo con los valores de medición. Las constantes A_1 y A_2 de la curva de dispersión, que se determinaron de esta manera, se evalúan a continuación como desplazamiento de la frecuencia de resonancia a una frecuencia particularmente pequeña y como desplazamiento de la frecuencia de resonancia a una frecuencia grande, precisamente como si se tratara de desplazamientos medidos de la frecuencia de resonancia.

En manuales, tales como el mencionado "Industrial microwave sensor", se puede encontrar (ecuación 2.31b, página 55) que la curva de dispersión, es decir, la dependencia de la frecuencia de la parte real ε'_r de las constantes dieléctricas relativas ε_r , en la proximidad de una relajación se puede describir a menudo mediante la relación Debye

$$5 \quad \varepsilon'_r = \varepsilon'_{r\infty} + \frac{\varepsilon'_{rs} - \varepsilon'_{r\infty}}{1 + (2\pi fT)^2}$$

donde $\varepsilon'_{r\infty}$ representa la permitividad a frecuencias muy altas, en las que ya no se puede configurar una polarización de orientación, ε'_{rs} representa la permitividad estática y T representa el tiempo de relajación. Dicho manual da a conocer además que en caso de que la parte real ε'_r de las constantes dieléctricas relativas sea esencialmente
 10 mayor que su parte imaginaria ε''_r , para la frecuencia de resonancia f_{r0} de un resonador de cavidad vacío y la frecuencia de resonancia f_r del resonador de cavidad lleno se cumple aproximadamente: $\varepsilon'_r \approx (f_{r0}/f_r)^2$ (ecuación 3.15, página 134). Dicho manual da a conocer también en la página 90 la aproximación $f_{r0}/f_r = f_{r0}/(f_{r0} - \Delta f_r) \approx 1 + (\Delta f_r/f_{r0})$.

En el procedimiento según la invención, las frecuencias de resonancia presentan preferentemente una distancia
 15 mínima. Esta distancia mínima es convenientemente de 0,5 GHz o más.

La distancia mínima prevista puede ser preferentemente de 3,0 GHz. Las frecuencias de resonancia utilizadas se encuentran preferentemente en un intervalo de 0,1 GHz a 40,0 GHz.

20 En el procedimiento según la invención, el valor de humedad F independiente de la densidad se calcula en dependencia de un cociente de dos desplazamientos de la frecuencia de resonancia. El cociente de dos desplazamientos de la frecuencia de resonancia depende de la humedad del producto, pero es independiente de la masa del producto.

25 Para un valor de humedad independiente de la humedad se hace uso preferentemente de una variable auxiliar φ . Una fórmula general para esta variable auxiliar es:

$$\varphi = \frac{c_1^{(1)} A_1}{c_2^{(2)} A_2} + c_0$$

30 donde $c_1^{(1)}$, $c_2^{(2)}$ y c_0 son números reales que se adaptan de manera convencional en un proceso de calibración.

Preferentemente se miden los desplazamientos de la frecuencia de resonancia para frecuencias de resonancia muy separadas. En este sentido se ha comprobado de manera particularmente preferida que un desplazamiento inferior de la frecuencia de resonancia a una frecuencia por debajo de dos GHz, en particular preferentemente por debajo de
 35 un GHz, resulta muy adecuado para la evaluación y en particular para el cálculo de la variable auxiliar. Asimismo, se toma preferentemente como base un desplazamiento superior de la frecuencia de resonancia por encima de 7 GHz, en particular preferentemente por encima de 10 GHz. Si la variable auxiliar φ se determina como cociente del desplazamiento superior e inferior de la frecuencia de resonancia, se pueden obtener valores de medición de humedad que no sólo son independientes de la densidad y/o de la masa, sino que también los resultados de
 40 medición son independientes de la fuerza del enlace del agua en el producto.

Con el fin de poder utilizar los desplazamientos de la frecuencia de resonancia durante la medición de varios de estos desplazamientos para determinar la curva de dispersión, estos se han de normalizar a un cuerpo de prueba. Este procedimiento de normalización garantiza que la distribución particular del campo de cada modo individual no
 45 influya sobre la medición. A tal efecto, para cada desplazamiento medido de la frecuencia de resonancia se define una constante de normalización K, por lo que todos los desplazamientos de la frecuencia de resonancia presentan el mismo valor en el cuerpo de referencia particular. Este cuerpo de referencia particular tiene la propiedad de no presentar efectos de dispersión en el intervalo de frecuencia considerado, o sea, para cada frecuencia de medición proporciona el valor idéntico. Éste puede estar fabricado, por ejemplo, de teflón o de otros materiales de plástico.
 50 Para el cuerpo de referencia se cumple:

$$A(f1) = K_2 \cdot A(f2) = K_3 \cdot A(f3) = \dots\dots\dots,$$

donde $A_i(f_i)$ identifica el desplazamiento de la frecuencia de resonancia del i -ésimo modo de resonancia con la frecuencia de resonancia f_1 , y K_2, K_3 , etc., son las constantes de normalización de valor real. Cuando se adapta la curva de dispersión, se tienen en cuenta entonces los desplazamientos normalizados de la frecuencia de resonancia $K_i A(f_i)$.

5

Una característica particularmente preferida, en particular en caso de la aplicación en procesos de lecho fluidizado, radica en considerar la temperatura del material dieléctrico, que se va a medir, al determinarse un valor de humedad F independiente de la densidad.

- 10 Los ensayos han demostrado que se pueden obtener muy buenos resultados en la determinación de la dependencia de la temperatura de una humedad F independiente de la densidad con la fórmula:

$$F(\varphi, T) = D_1(T)f(\varphi) + D_2(T),$$

- 15 donde $D_1(T)$ y $D_2(T)$ son funciones reales, dependientes de la temperatura T , y $f(\varphi)$ es una función auxiliar dependiente de la variable auxiliar φ . En una implementación de esta relación mediante la técnica de regulación se puede predefinir, por ejemplo, un campo de características, dependiente de la temperatura, que contiene la relación entre el valor medido φ y la humedad F independiente de la densidad. La función auxiliar f está configurada preferentemente como una función monótona creciente.

20

En una configuración conveniente, la función auxiliar $f(\varphi)$ es la función identidad, por lo que el valor para la humedad F independiente de la densidad se calcula como:

$$F(\varphi, T) = D_1(T)\varphi + D_2(T)$$

25

Se ha comprobado también que la función arcotangente con su intervalo limitado es muy adecuada como función auxiliar, con la que el valor de humedad F independiente de la densidad da lugar a:

$$F(\varphi, T) = D_1(T)\arctan(\varphi) + D_2(T)$$

30

En una variante preferida del procedimiento según la invención, un valor de densidad R independiente de la humedad se calcula en dependencia de al menos dos desplazamientos de la frecuencia de resonancia. El valor de densidad R independiente de la humedad se determina también convenientemente en dependencia de la temperatura.

35

En caso de utilizarse otra función auxiliar L , que es una función de los desplazamientos individuales de la frecuencia de resonancia A_i , los ensayos han demostrado que la dependencia de la temperatura de la densidad R independiente de la humedad se puede calcular de la manera siguiente:

40

$$R(T, A_i) = 1_1(T)L(A_i) + 1_2(T).$$

Los coeficientes $1_1(T)$ y $1_2(T)$ son aquí funciones reales, dependientes de la temperatura.

- 45 De manera alternativa a la función auxiliar L que es una función de los desplazamientos individuales de la frecuencia de resonancia, el valor de densidad R independiente de la humedad se puede calcular también adicionalmente en dependencia de un producto de uno de los desplazamientos de la frecuencia de resonancia y de la variable auxiliar φ utilizada para determinar el valor de humedad F .

- 50 En una variante preferida del procedimiento según la invención, un valor de medición M independiente de la humedad se calcula en dependencia de al menos dos desplazamientos de la frecuencia de resonancia. El valor de densidad R independiente de la humedad se determina también convenientemente en dependencia de la temperatura. En dependencia del tipo de material de medición, este valor de masa puede proporcionar información sobre la masa total, la masa relativa a la superficie o la masa por unidad de longitud. La dependencia de la temperatura se tiene en cuenta aquí como cuando se determina la densidad.

55

En una variante preferida del procedimiento, según la invención, se puede calcular adicionalmente un tamaño de

partícula D a partir del desplazamiento de la frecuencia de resonancia. Tal valor es relevante en particular si se mide un material a granel móvil o en un proceso de lecho fluidizado.

En general, en el procedimiento según la invención puede estar previsto como material dieléctrico un material a granel, cuerpos sólidos discretos pequeños, cuerpos sólidos en forma de varilla, banda o hilo. Todos los materiales dieléctricos se pueden medir en estado móvil o estático.

A continuación se explican detalladamente ejemplos de realización preferidos por medio de las figuras. Muestran:

Fig. 1 la potencia de microondas T sobre la frecuencia para tres modos de resonancia con frecuencias de resonancia diferentes f_0 , f_1 , f_2 ;

Fig. 2 la potencia de microondas T sobre la frecuencia para dos modos de resonancia, en cada caso en el estado lleno o no lleno del resonador de microondas;

Fig. 3 una disposición de resonador para medir la transmisión;

Fig. 4 un dibujo esquemático de la sección transversal de dos resonadores coaxiales con un modo de resonancia respectivamente, que están dispuestos uno al lado de otro y presentan frecuencias de resonancia diferentes;

Fig. 5 dos resonadores con un modo de resonancia respectivamente, que están conectados a un sistema electrónico de microondas mediante un conmutador;

Fig. 6 dos resonadores con un modo de resonancia respectivamente, que están conectados en cada caso a un sistema microelectrónico;

Fig. 7 la utilización de un sensor planar en un secador de lecho fluidizado;

Fig. 8 un ejemplo de medición para medir la humedad en granulado de lactosa de un proceso de lecho fluidizado, estando representados uno sobre otro desplazamientos de la frecuencia de resonancia de dos modos de resonancia para distintas densidades y humedades;

Fig. 9 otro ejemplo de medición para medir la humedad en granulado de lactosa de un proceso de lecho fluidizado con un resonador planar con varios modos de resonancia;

Fig. 10 un conjunto de curvas de dispersión para la dependencia del desplazamiento de la frecuencia de resonancia con respecto a la frecuencia representada de manera logarítmica; y

Fig. 11 la curva de calibración de humedad independiente de la densidad y del enlace, que se obtuvo de la figura 10.

El procedimiento de medición, según la invención, sirve para medir la humedad de manera independiente de la densidad o la masa. Éste se puede utilizar asimismo para medir la densidad y/o la masa y/o el tamaño de grano de materiales dieléctricos. En los procesos industriales, al igual que en las aplicaciones de laboratorio, tales procedimientos tienen una importancia fundamental tanto para el control del proceso como para la determinación de la calidad. El procedimiento, según la invención, se puede aplicar en todos los materiales dieléctricos, por ejemplo, materiales a granel (cereales, café, productos en polvo, tabaco, etc.), cuerpos sólidos discretos pequeños (tabletas, cápsulas medicinales, etc.), cuerpos sólidos grandes en forma de barra o banda (madera, papel, barras de cigarrillos) y textiles (bandas de fibras, hilos o cintas de tela, etc.). El procedimiento, según la invención, se puede utilizar también en líquidos especiales, por ejemplo, acetona.

Con ayuda del procedimiento de medición descrito se puede determinar respectivamente la humedad del material de medición, en casos especiales también la densidad o la masa, así como el tamaño de grano del material de medición, por ejemplo, en granulados. La masa del material dieléctrico, que se va a determinar, puede ser una masa total o la masa por unidad de superficie o longitud.

El procedimiento, según la invención, se puede aplicar en cualquier lugar en el que esté prevista una señal de humedad independiente de la densidad y la masa para el control del proceso online. Se puede utilizar también en un material de medición que se mueve rápidamente. Al aplicarse en particular en procesos de lecho fluidizado, el procedimiento según la invención abre la posibilidad de aumentar la calidad del proceso.

En el caso del procedimiento, según la invención, se trata de una medición de dos parámetros sin utilizarse la atenuación de un modo de resonancia. Los dos parámetros medidos se determinan mediante la utilización de dos modos de resonancia, cuyas frecuencias de resonancia presentan una distancia suficientemente grande entre sí. Preferentemente, las frecuencias de resonancia están separadas una de otra en al menos 0,5 gigahercio. Convenientemente pueden estar previstos también tres o más gigahercios como distancia entre las frecuencias de resonancia.

La figura 1 muestra tres curvas de resonancia 10, 12, 14, identificadas respectivamente mediante su frecuencia de resonancia f_0 , f_1 , f_2 y la anchura de la curva de resonancia b_0 , b_1 y b_2 . En el ejemplo representado, la amplitud de la curva de resonancia o la potencia de microondas 10 es claramente mayor que las amplitudes de las curvas de resonancia 12 y 14. Sin embargo, para el procedimiento de medición según la invención, los valores de las amplitudes de resonancia y las anchuras de las curvas de resonancia b_0 , b_1 y b_2 no tienen ninguna importancia al determinarse la humedad.

Para una evaluación de los resultados de medición es importante la variación de una frecuencia de resonancia de un modo en el resonador, en cuyo intervalo de campo se encuentra el producto, con respecto a la frecuencia de resonancia del mismo modo en el resonador vacío. La diferencia de las dos frecuencias de resonancia se identifica como una llamada desintonización de la frecuencia de resonancia o un desplazamiento de la frecuencia de resonancia.

La figura 2 muestra un ejemplo simple de dos desplazamientos de la frecuencia de resonancia, presentando un primer modo de resonancia una frecuencia de resonancia menor. En la figura 2 está representada la frecuencia de resonancia f_{01} que muestra la respuesta en frecuencia para la primera frecuencia de resonancia en un resonador no lleno. La curva de resonancia correspondiente está identificada con el número 16. En el estado lleno del resonador se obtiene la frecuencia de resonancia f_{11} con la curva de resonancia 18. Asimismo, está representado el desplazamiento de la frecuencia de resonancia Δf_1 resultante para la primera frecuencia. El desplazamiento de frecuencia de resonancia de las frecuencias de resonancia se origina a través del producto que se va a medir. Asimismo, está representada la frecuencia de resonancia f_{02} para la frecuencia mayor. La curva de resonancia correspondiente está identificada con el número 20. A través del material a medir tiene lugar un desplazamiento de la frecuencia de resonancia f_{02} hasta el valor f_{12} . El respectivo desplazamiento de la frecuencia de resonancia está representado como Δf_2 en la figura 2.

Los valores de medición Δf_1 , Δf_2 están muy influenciados por la masa del producto a medir, que se encuentra en el intervalo de campo del resonador de microondas. Si se utiliza material en polvo, los valores de medición Δf_1 , Δf_2 dependen también del tamaño del granulado. En caso de un material planiforme con un grosor de capa pequeño, el resultado de medición depende fuertemente del grosor de capa medido.

Los valores de medición Δf_1 , Δf_2 son proporcionales a la masa del producto en el campo de medición para cada modo de resonancia, cuyo campo de medición es atravesado por el producto. Esto significa que cuando el campo de medición está completamente lleno, los valores de medición son proporcionales a su densidad. Dado que la constante dieléctrica del agua es esencialmente mayor que la constante dieléctrica de sustancias secas, los valores de medición Δf_1 , Δf_2 dependen también fuertemente de la humedad del material. La constante dieléctrica del agua libre depende también considerablemente de la frecuencia en el intervalo de microondas. Por encima de una frecuencia de un gigahercio, ésta disminuye claramente a medida que aumenta la frecuencia y se aproxima en caso de frecuencias superiores a 30 gigahercios a un valor bajo, determinado mediante la distribución de electrones del átomo. Esto significa que la constante dieléctrica de un material de medición húmedo es menor a una frecuencia alta que a una frecuencia baja.

Si Δf_1 es la desintonización de la resonancia con respecto al estado vacío de un material a medir en el primer modo de resonancia con la frecuencia de resonancia vacía f_{01} y si Δf_2 es la desintonización de la frecuencia de resonancia con respecto al estado vacío de un material a medir en el segundo modo de resonancia con una frecuencia de resonancia vacía f_{02} , entonces los valores Δf_1 , Δf_2 son proporcionales respectivamente a la masa. Sin embargo, Δf_1 y Δf_2 dependen de manera diferente de la humedad del material, si las dos frecuencias de resonancia de los modos están separadas suficientemente una de otra. Se ha comprobado que una distancia de $|f_{02}-f_{01}| \geq 0,5$ gigahercio es una distancia suficientemente grande. Se pueden obtener resultados de medición más claros si la distancia de la frecuencia de resonancia es $|f_{02}-f_{01}| \geq 3,0$ gigahercio.

Los ensayos han demostrado que el cociente $\Delta f_2/\Delta f_1$ es independiente de la masa del producto, pero constituye una medida de la humedad del producto. El cociente se calibra como valor de humedad, medido indirectamente, a una humedad de referencia medida directamente.

5 A continuación:

$$A1 = \Delta f_1 y A2 = \Delta f_2.$$

10 Puede estar previsto utilizar una variable auxiliar $\varphi = \arctan(A2/A1)$ para delimitar el intervalo de valores de los valores de medición de microondas.

Los resultados de medición muestran que si en un sistema de coordenadas, los valores de referencia A2 se representan contra A1, los puntos de medición con una masa diferente, pero la misma humedad están situados en una recta y pasan por el punto cero. Los puntos de medición con la misma humedad, pero con una masa diferente
15 están situados respectivamente en rectas, cuya inclinación depende de la humedad.

Para aumentar la exactitud de la medición, no sólo dos, sino también tres, cuatro o más modos de resonancia separados suficientemente entre sí pueden interactuar según la invención con el material de medición. En este caso se pueden definir parámetros de acoplamiento K para los modos de resonancia individuales. Los parámetros de
20 acoplamiento K se determinan para los modos de resonancia individuales con ayuda de un cuerpo de prueba estándar, por lo que la desintonización de la frecuencia de resonancia del primer modo A1 al medirse el cuerpo de prueba estándar provoca el mismo desplazamiento de la frecuencia de resonancia que en los demás modos de resonancia, si se utiliza el mismo cuerpo de prueba estándar. Si se consideran, por ejemplo, cuatro modos de resonancia, se obtiene entonces la siguiente ecuación de condición para los parámetros de acoplamiento K2, K3 y
25 K4:

$$A(f1) = K2 \cdot A(f2) = K3 \cdot A(f3) = K4 \cdot A(f4)$$

(al medirse el cuerpo de prueba estándar)

30 Con el fin de compensar la influencia de la temperatura sobre la humedad F, independiente de la densidad, se mide la temperatura T del producto mediante un sensor de temperatura separado. Los ensayos han demostrado que es suficiente una influencia lineal de la temperatura T del producto sobre los coeficientes en la curva de humedad. Si para la humedad independiente de la densidad se selecciona la fórmula:

$$35 \quad F(\varphi, T) = C1(T) \cdot \arctan(\varphi) + C2(T),$$

los coeficientes de temperatura C1 y C2 se pueden representar de manera suficientemente exacta en cada caso con una dependencia lineal de la temperatura. Se obtiene:

$$40 \quad C1 = C1^{(1)} \cdot T + C1^{(2)},$$

$$C2 = C2^{(1)} \cdot T + C2^{(2)},$$

con los coeficientes reales $C1^{(1)}$, $C2^{(1)}$, $C1^{(2)}$, $C2^{(2)}$. Si con el método anterior se calculó un valor dependiente sólo de la humedad del material, pero independiente de la densidad del material, de la masa del material, así como del tamaño de grano, la utilización de un valor A1, A2 proporcional a la masa permite determinar la masa M en el campo de
45 medición y/o la densidad de material R y/o el tamaño de grano K con la variable auxiliar φ dependiente sólo de la humedad. En este sentido resulta importante que la variable auxiliar φ sea dependiente de la humedad e independiente de la masa. Por consiguiente, es conveniente determinar con ayuda de φ una corrección del valor A1, A2 dependiente de la masa y calcular así el contenido de humedad.

50 Al igual que en la medición de la humedad, los resultados de medición han demostrado en este caso que una fórmula lineal para la evaluación de los valores de medición proporciona muy buenos resultados. Para la determinación de un valor de medición independiente de la humedad se selecciona la fórmula:

$$M = D2A2 + D1A1 \cdot \varphi + D0,$$

donde D0, D1, D2 son números reales.

- 5 En esta fórmula resulta evidente que la masa M se calcula a partir de un contenido A2, dependiente de la masa, que se corrige mediante un contenido φ dependiente de la humedad.

En una fórmula alternativa, la masa se puede calcular también con:

10
$$M = D1A1 + D2A2 + D0.$$

Estas fórmulas se pueden utilizar asimismo para evaluar una densidad R, si la construcción del proceso de medición garantiza que esté presente una distribución completa de la masa en el resonador de microondas, es decir, que todo el campo de medición del resonador esté lleno de material de medición.

- 15 Estas fórmulas son válidas asimismo para determinar un tamaño de grano K en materiales a granel y en procesos de lecho fluidizado.

- 20 Incluso al determinarse la masa y/o la densidad y/o al determinarse el tamaño de grano se puede realizar una corrección, dependiente de la temperatura, de los valores de medición. En este sentido resulta adecuado también representar los coeficientes D1, D2, que aparecen con el desplazamiento de la frecuencia de resonancia en el resultado de medición, en dependencia de la temperatura:

$$D1 = D1^{(1)} \cdot T + D1^{(2)},$$

$$D2 = D2^{(1)} \cdot T + D2^{(2)},$$

- 25 La figura 3 muestra en una vista muy esquemática una posible implementación de la invención relativa al equipamiento. La figura 3 muestra un resonador de microondas planar 24, accionado en modo de transmisión, cuyo campo es atravesado por un material de medición 26. La constante dieléctrica del material de medición 26 provoca que los modos de resonancia del resonador 24 varíen de una manera característica. En la unidad de microondas 28 se generan microondas de frecuencia variable mediante un generador de microondas y se transmiten al resonador de microondas 24 a través de un primer cable coaxial 30. Las microondas se acoplan aquí al resonador por medio de una antena. En el resonador se configuran distintos modos de resonancia, cuyas líneas de campo se extienden hasta el material de medición 26. Mediante otra antena (no representada) en el resonador de microondas 24, las microondas se desacoplan del resonador y retornan a la unidad de microondas 28 a través de un segundo cable coaxial 32. Aquí se determinan las frecuencias de resonancia del resonador lleno. La comparación con las frecuencias de resonancia, determinadas antes, del resonador de microondas vacío permite determinar los desplazamientos de la frecuencia de resonancia sobre la base del material de medición 26. Una frecuencia de resonancia se puede determinar, por ejemplo, mediante el máximo en la curva de resonancia. Alternativamente es posible también tener en cuenta el desfase del campo reflectado con respecto al campo transmitido. En la frecuencia de resonancia hay una transición a cero en el desfase de la onda entrante a la onda saliente.

- 45 Si un resonador de microondas se opera en el modo de reflexión, es suficiente una configuración con un cable coaxial de microondas entre la unidad de evaluación y el resonador de microondas. Se mide la potencia de microondas reflectada mediante este cable. El caso de resonancia se detecta, si está presente un mínimo de la potencia reflectada.

- La figura 4 muestra la construcción más detallada de un resonador de microondas. En este caso se trata de dos resonadores coaxiales 34 y 36. El resonador 34 está previsto para la frecuencia de resonancia mayor, mientras que el resonador 36 presenta una frecuencia de resonancia menor. En cada uno de los resonadores 34 y 36 salen líneas de campo 38, 40 del cuerpo de resonador 42. El resonador puede estar protegido mediante una placa de recubrimiento dieléctrica 44. En este resonador, el material de medición a medir se encuentra en la zona de las líneas de campo 38 y 40 que salen.

- Las figuras 5 y 6 muestran otra configuración, en la que el producto se mide con resonadores diferentes, cuyas frecuencias de resonancia están muy separadas. La figura 5 muestra dos resonadores de microondas 46, 48

superpuestos y unidos entre sí mediante un tubo de prueba 50. El flujo de material 52, mostrado esquemáticamente, se alimenta primero mediante el tubo de prueba 50 al resonador de microondas 46, sale del mismo y entra en el resonador de microondas 48. Resulta evidente que para una medición correcta, la distancia entre la inhomogeneidades presentes eventualmente en el material de medición debe ser claramente mayor que la distancia espacial entre los dos resonadores 46 y 48.

En el ejemplo de realización representado en la figura 5 está previsto un sistema electrónico de microondas 56 que presenta un generador de microondas, un detector de microondas y una CPU. Un conmutador de microondas 54 transmite las señales a los resonadores de microondas 46 ó 48. Las señales, que retornan, de los dos resonadores de microondas regresan también mediante el conmutador 54 al sistema electrónico de microondas para la evaluación.

La figura 6 muestra una construcción de resonadores de microondas similar en principio a la figura 5. Sin embargo, se prescinde del conmutador de microondas y en su lugar se disponen dos sistemas electrónicos de microondas 58 y 60 que generan las microondas acopladas a los resonadores 46 y 48, detectan los componentes desacoplados y evalúan los valores de resonancia medidos.

La figura 7 muestra la aplicación de un sensor planar 62 en un secador de lecho fluidizado 64 representado esquemáticamente. En el secador de lecho fluidizado, representado a modo de ejemplo, se sopla centralmente aire caliente 66 que provoca un movimiento de material 68. Durante el movimiento de material 68, el material pasa a lo largo de un estrechamiento cónico del secador de lecho fluidizado 64 por delante de un sensor planar 62 que puede medir en al menos dos modos de resonancia con la distancia de frecuencia requerida.

En el ejemplo mostrado en la figura 7, el resonador de microondas 62 está dispuesto en una sección de hombro del secador de lecho fluidizado. Esto garantiza el paso de un flujo de material uniforme por delante del resonador de microondas 62.

La medición de la humedad y la densidad en el proceso de lecho fluidizado permite su control. Es posible, por ejemplo, controlar o regular el tamaño de grano promedio durante la fase de granulación. Como ya se explicó arriba, el procedimiento permite también con la variable auxiliar φ una medición online del tamaño de grano. El tamaño de grano medido se envía a un control de un secador para controlar sus parámetros de proceso, por ejemplo, la temperatura. Además, se puede definir también el punto final del proceso de secado mediante la medición de humedad, independiente de la densidad, al desconectarse el proceso de secado cuando se alcanza una humedad final predeterminada.

La figura 8 muestra a modo de ejemplo la medición de humedad en un granulado de lactosa de un proceso de lecho fluidizado con un resonador planar con varios modos de resonancia. Están representados puntos de medición con dos humedades diferentes (1% y 4,8%) y densidades distintas. Las mediciones se realizaron en dos modos de resonancia distintos (1,8 GHz y 5,8 GHz). En este caso, la diferencia de los desplazamientos de la frecuencia de resonancia A_1-A_2 está representada sobre el desplazamiento de la frecuencia de resonancia del modo con la frecuencia mayor A_2 . Se muestra que los puntos con la misma humedad están situados en rectas y que su posición en esta recta se determina mediante la densidad de material respectiva o la masa de material en el campo de medición. Los puntos con una humedad diferente están situados en rectas a través del origen de coordenadas, cuya inclinación depende de la humedad. El valor de humedad independiente de la densidad se calcula en este ejemplo a partir de la variable auxiliar $\varphi=(A_1-A_2)/A_2$.

La figura 9 muestra a modo de ejemplo la medición de humedad en un granulado de lactosa de un proceso de lecho fluidizado con un resonador planar con varios modos de resonancia. En cada caso está representada la variable auxiliar φ para la medición de humedad, que se forma a partir del cociente de dos desplazamientos de la frecuencia de resonancia A_1 y A_i ($i=2, 3, 4$) de acuerdo con la siguiente especificación: $\varphi=(A_1/A_i)-1$. Las curvas diferentes 70, 72, 74 indican para diferentes muestras el valor de las variables auxiliares (A_1/A_i-1) en modos de resonancia de 3,4 GHz (A_2), 4,7 GHz (A_3) y 5,84 GHz (A_4). La dependencia de los valores de medición con respecto a la humedad se puede observar claramente, siendo mayor el efecto de medición mientras más separados están los modos de resonancia medidos.

La figura 10 muestra un conjunto de curvas de dispersión 76, 78, 80 y 82. Las curvas muestran el desplazamiento de la frecuencia de resonancia A sobre la frecuencia f representada de manera logarítmica. Los puntos de medición dibujados corresponden a la medición de un cuerpo de prueba con valores de humedad diferentes. En caso de una humedad de 2,8%, los valores de medición registrados (circuitos llenos) son muy compatibles con la curva 76.

Asimismo, los valores de medición a una humedad de 4,8%, 7,2% y 8,5% están muy cerca en las curvas 78, 80 y 82 adaptadas respectivamente. A partir de las curvas, que tienen un desarrollo general

$$A(f) = A_1 + \frac{A_2}{1 + (2\pi f\tau)^2}$$

5

donde A_1 y A_2 describen los desplazamientos de la frecuencia de resonancia a una frecuencia baja y una frecuencia muy alta y τ es una medida de la fuerza del enlace del agua. Los valores A_1 y A_2 , determinados a partir de la curva de medición, están representados para la curva 76 a modo de ejemplo en la figura 10. Los valores A_1 y A_2 proporcionan información sobre el desplazamiento de la frecuencia de resonancia a una frecuencia muy pequeña o a una frecuencia muy alta respectivamente. Los valores A_1 y A_2 se pueden evaluar con el procedimiento según la invención como si se tratara de valores medidos.

10

La figura 11 muestra los valores obtenidos a partir de los valores A_1 y A_2 de la figura 10

15

$$\varphi = \frac{A_1}{A_2} - 1$$

como función de la humedad. Esta curva de calibración de humedad no sólo es independiente de la masa y la densidad, sino también de la fuerza del enlace del agua en el producto. Esto significa también una clara reducción de la influencia de la temperatura sobre la calibración.

20

Las ventajas particulares de la invención respecto a las pruebas de medición conocidas hasta el momento radican en que ya no es necesaria una medición de atenuación, sino que sólo se ha de detectar una frecuencia de resonancia o su desplazamiento. Dado que la frecuencia en presencia de amplitudes de resonancia máximas se puede medir más fácilmente que, por ejemplo, la anchura de resonancia en caso de la mitad de amplitud, la medición se puede realizar claramente con mayor rapidez que en los métodos de medición anteriores. Para la medición de la anchura de resonancia, por ejemplo, se ha de recorrer y medir toda la curva de resonancia en términos de frecuencia. Esto origina problemas, por ejemplo, en caso de materiales móviles, porque el material de medición no se puede desplazar durante el recorrido por la curva de resonancia. A diferencia de esto, en el nuevo método de medición sólo es necesario analizar la zona del máximo de resonancia, de modo que los movimientos del producto durante el proceso de medición no provocan un efecto negativo. Por tanto, precisamente en procesos de lecho fluidizado y materiales a granel móviles se puede medir también fácilmente un producto movido con rapidez.

25

30

Otra ventaja del procedimiento según la invención se deriva también de una comparación con la medición, realizada hasta el momento, de la atenuación y la anchura de la curva de resonancia: En caso de valores de atenuación mayores son importantes las no linealidades de los diodos de microondas que pueden falsear el resultado de medición. A diferencia de esto, en el presente procedimiento de medición no tienen importancia las no linealidades de los diodos de microondas.

35

Otra ventaja particular radica en que la variación de la frecuencia se puede mover en un intervalo estrecho alrededor del máximo de la resonancia actual. A diferencia de una medición de atenuación, ya no es necesario recorrer toda la curva de resonancia. Esto posibilita una medición a alta velocidad con 10^4 a 10^5 valores de medición por segundo.

40

El propio resonador de microondas para el procedimiento según la invención puede presentar también un diseño significativamente más simple que en una medición de atenuación. Así, por ejemplo, se puede prescindir de aisladores de microondas complicados y costosos para impedir la retrodispersión al sistema electrónico.

45

A diferencia de los procedimientos de medición convencionales que funcionan según el método de resonancia de microondas, en el caso de la invención se puede eliminar también el requerimiento relativo a la libertad de emisión plena de los resonadores de microondas. La emisión, en la que el resonador pierde una parte de su energía de oscilación en forma de microondas emitidas, tiene siempre principalmente el efecto de un aumento de la anchura de la curva de resonancia durante la medición de microondas. Por tanto, una medición de atenuación o anchura exige cumplir incondicionalmente el requerimiento relativo a la libertad de emisión plena del resonador. En caso contrario, las pérdidas medidas se atribuyen a la humedad del producto, es decir, provocan errores de medición considerables. Según la invención, se prescinde de la medición de atenuación, por lo que dentro de ciertas tolerancias se permite

50

también la emisión de microondas. Por consiguiente, se pueden utilizar también modos de microondas con un campo de dispersión relativamente grande y una cierta emisión, siempre que la emisión no influya en gran medida sobre la frecuencia de resonancia. Otra ventaja particular del procedimiento según la invención en caso de utilizarse sensores planares radica en que aumenta la profundidad de penetración, de modo que se puede prescindir, por
5 ejemplo, de una medición por contacto.

Los desplazamientos de la frecuencia de resonancia se pueden detectar también fácilmente online en procesos de lecho fluidizado con el fin de generar así valores de humedad fiables para controlar el proceso de granulación y un proceso de secado siguiente.

10

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para medir un valor de humedad F de materiales dieléctricos mediante la utilización de al menos un resonador de microondas, midiéndose respectivamente un desplazamiento para al menos dos modos de resonancia con frecuencias de resonancia distintas entre sí, determinándose los desplazamientos respectivamente como diferencia de la frecuencia de resonancia del resonador vacío con respecto al resonador, en cuyo intervalo de campo se encuentra el material dieléctrico, y calculándose a partir de los desplazamientos medidos de la frecuencia de resonancia un valor de humedad F independiente de la densidad, calculándose el valor de humedad F, independiente de la densidad, en dependencia de un cociente de dos desplazamientos de las frecuencias de resonancia y determinándose el valor de humedad F, independiente de la densidad, de manera independiente de una atenuación producida en cada uno de los modos de resonancia y determinándose tres o más puntos de medición para el desplazamiento de la frecuencia de resonancia a partir de una curva de dispersión A (f) con la forma siguiente

$$A(f) = A_1 + \frac{A_2}{1 + (2\pi f\tau)^2}$$

donde A₁, A₂ y τ son constantes de valor real, de las que A₁ y A₂ se definen de acuerdo con los valores medidos y los valores A₁ y A₂ de la curva de dispersión se fijan y se evalúan como desplazamientos de la frecuencia de resonancia a una frecuencia pequeña y una frecuencia grande.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** un valor de densidad R independiente de la humedad y/o un valor de masa M independiente de la humedad se calculan adicionalmente en dependencia de al menos dos desplazamientos de la frecuencia de resonancia.
3. Procedimiento según la reivindicación 1 ó 2, **caracterizado porque** como material dieléctrico están previstos un material a granel, cuerpos sólidos discretos pequeños, cuerpos sólidos en forma de varilla, banda o hilo.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado porque** en un proceso de granulación, instantaneización, recubrimiento o secado, el valor de humedad medido se transmite a un control de proceso que controla y/o regula el proceso en dependencia del valor de humedad aplicado.
5. Procedimiento según la reivindicación 4, **caracterizado porque** el control de proceso determina por medio de los valores de humedad medidos un final de proceso o un final de una etapa de proceso.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 2 a 5, **caracterizado porque** en un proceso de granulación, instantaneización, recubrimiento o secado, el valor medido de masa, densidad y/o tamaño de grano se transmite a un control de proceso que controla y/o regula el proceso en dependencia de los valores aplicados de masa, densidad y/o tamaño de grano.
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, **caracterizado porque** al menos dos modos de resonancia presentan respectivamente una frecuencia de resonancia situada a una distancia una de otra de al menos 0.5 GHz.

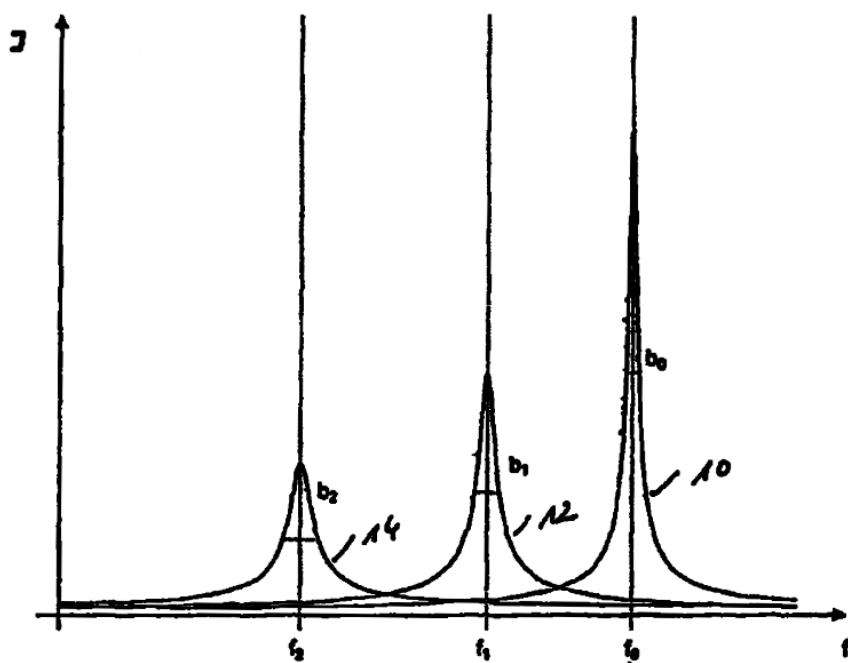


Fig. 1

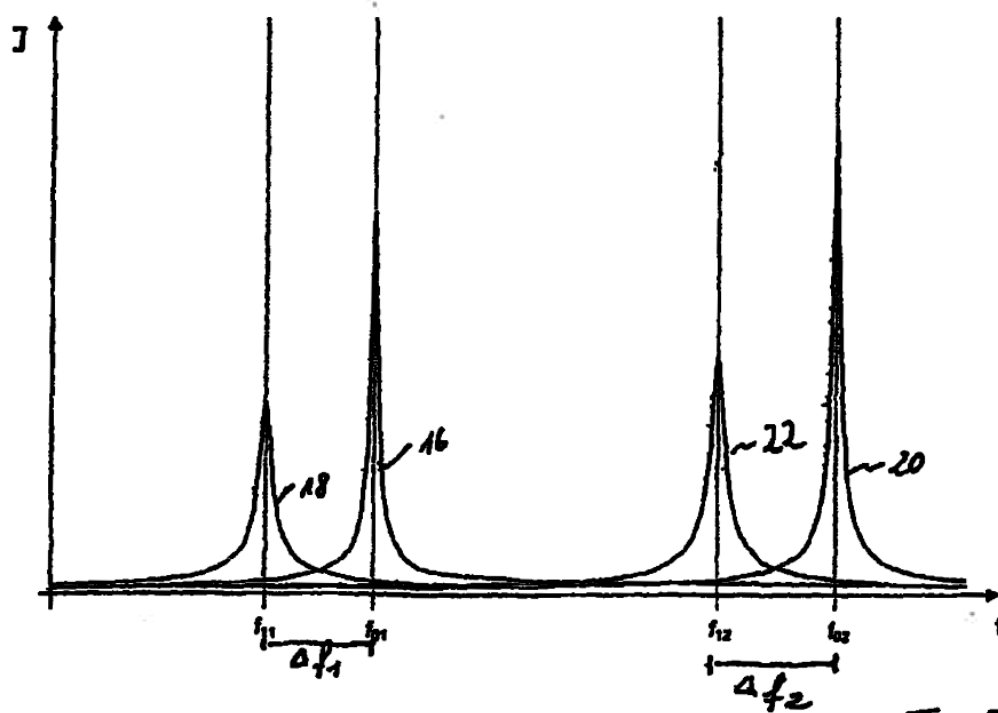


Fig. 2

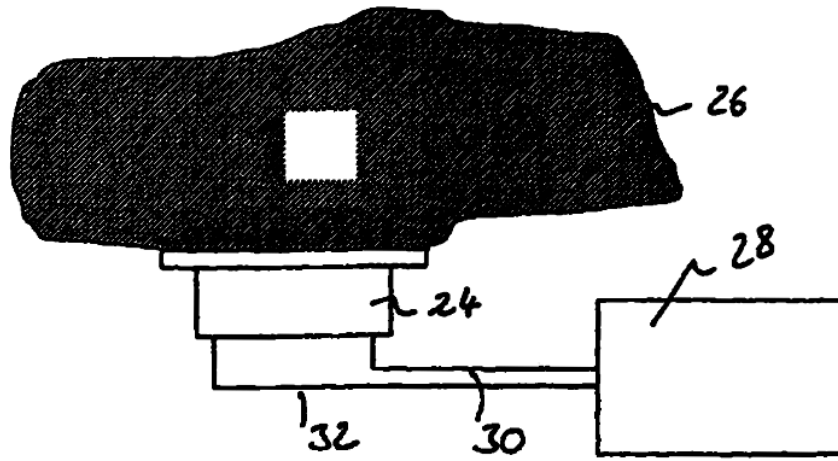


Fig. 3

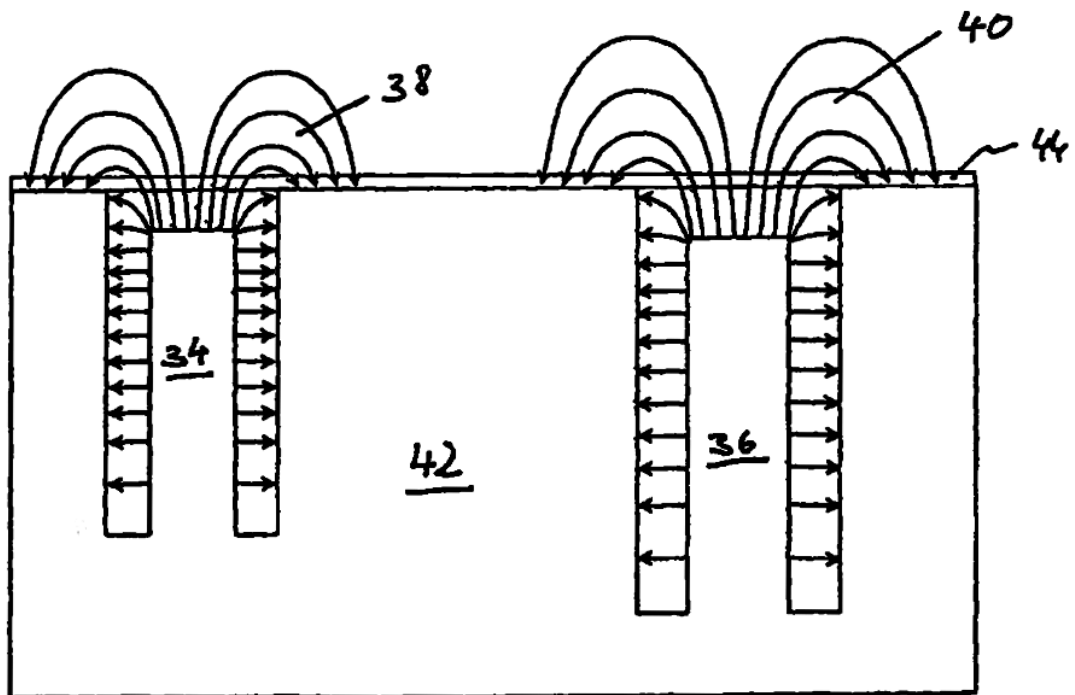
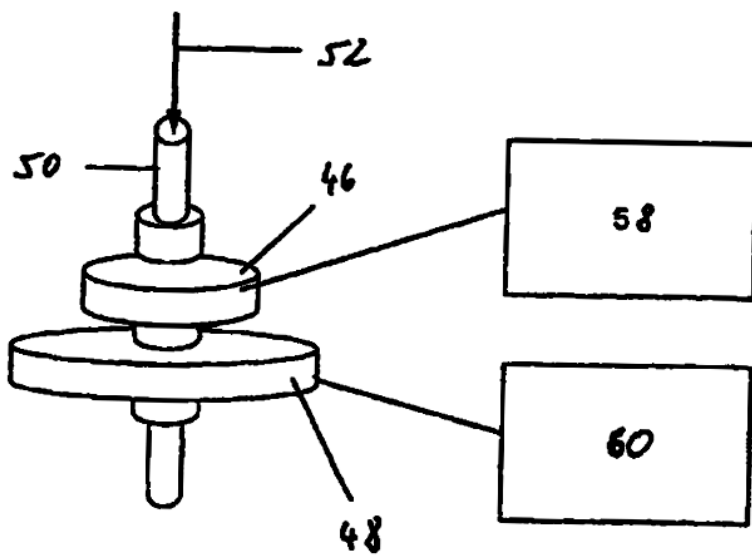
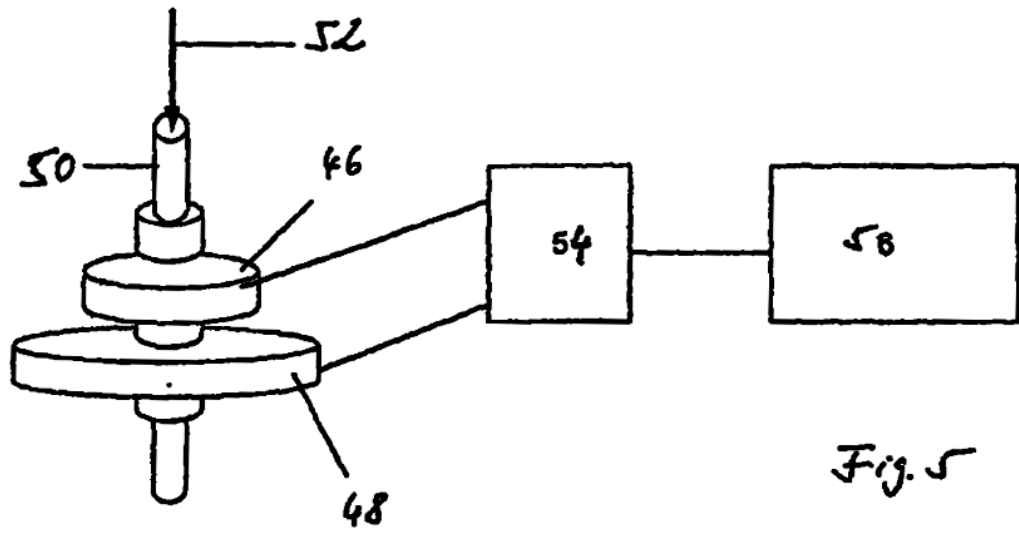


Fig. 4



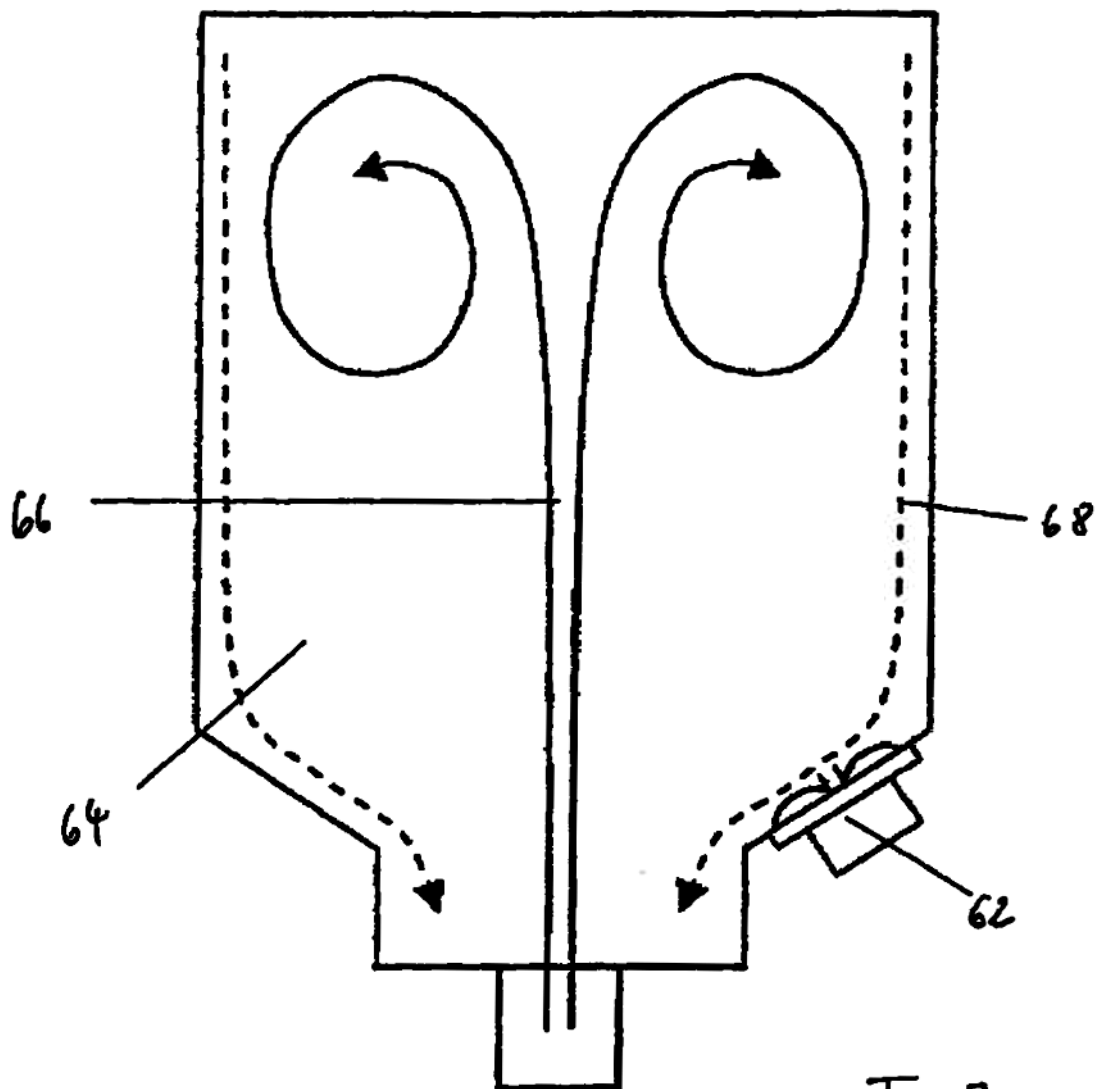


Fig. 7

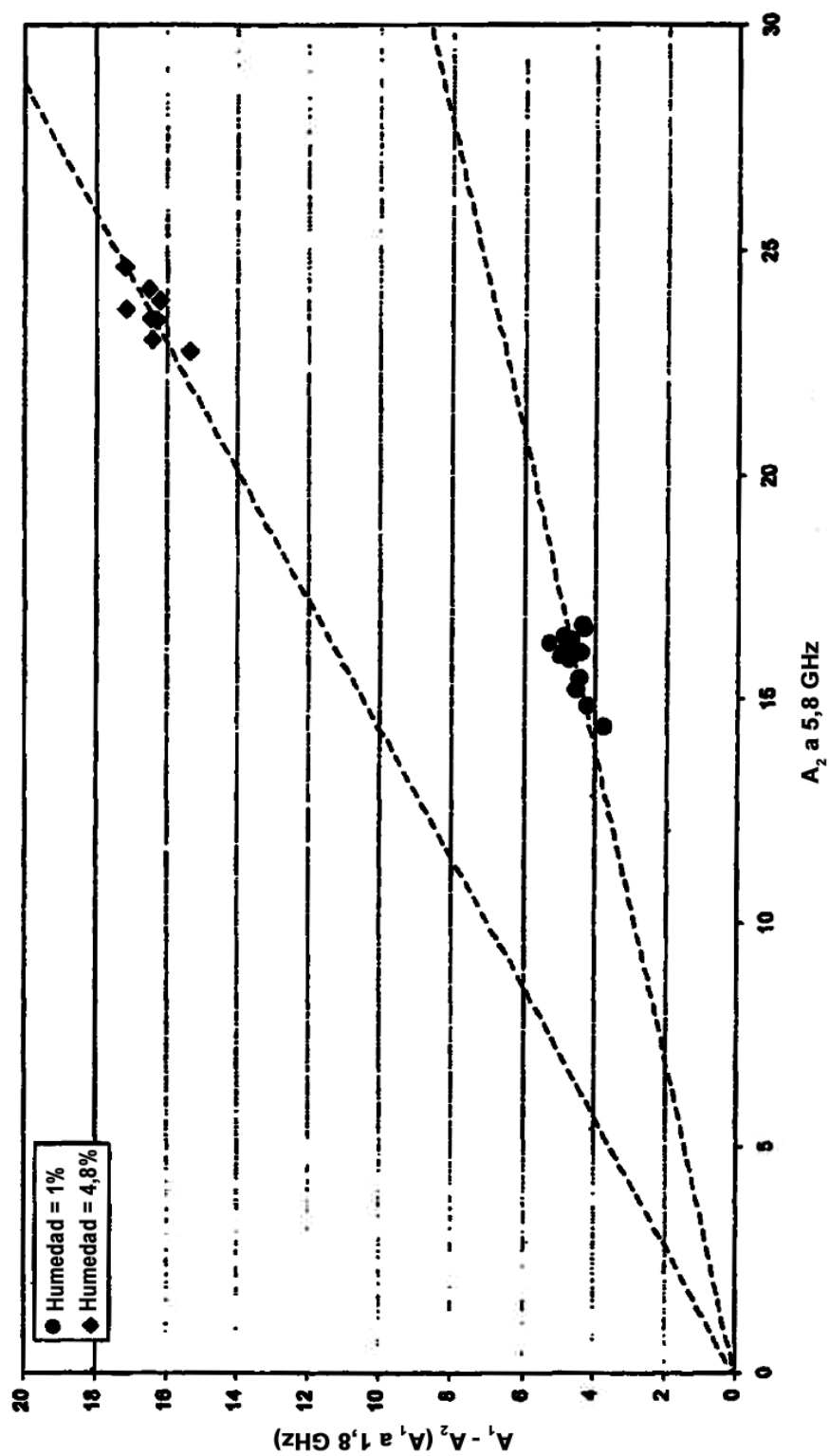


Fig. 8

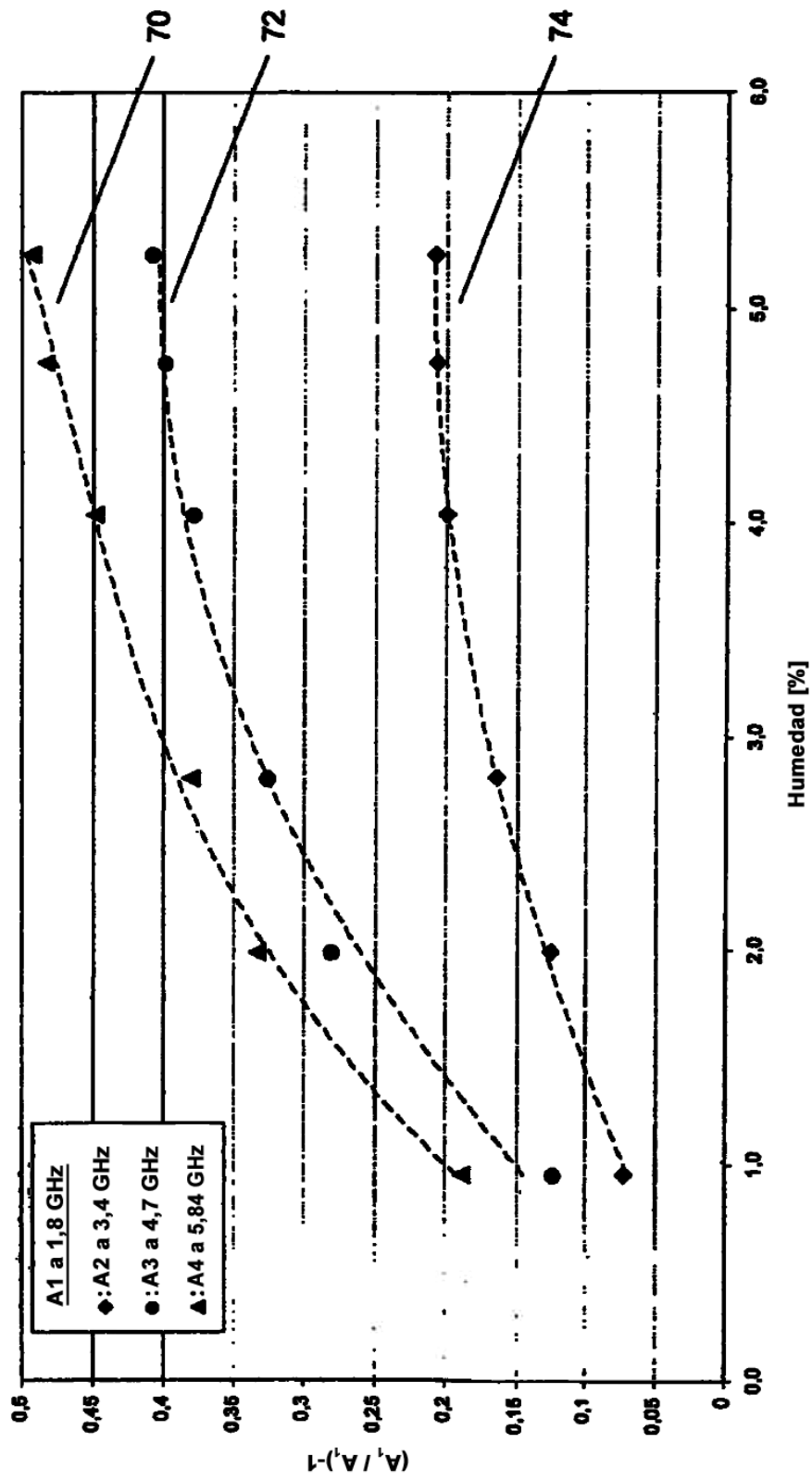


Fig. 9

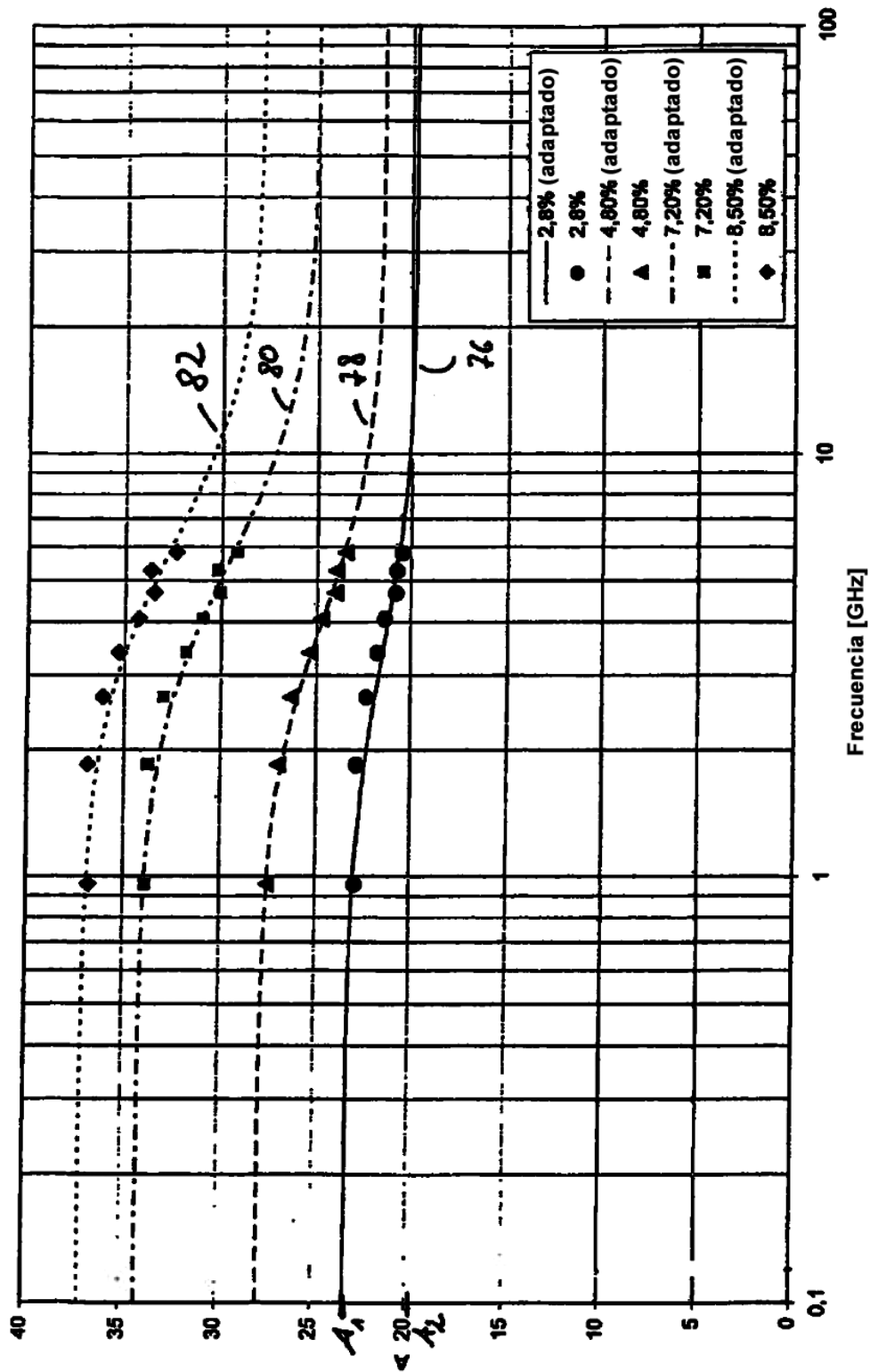


Fig. 10

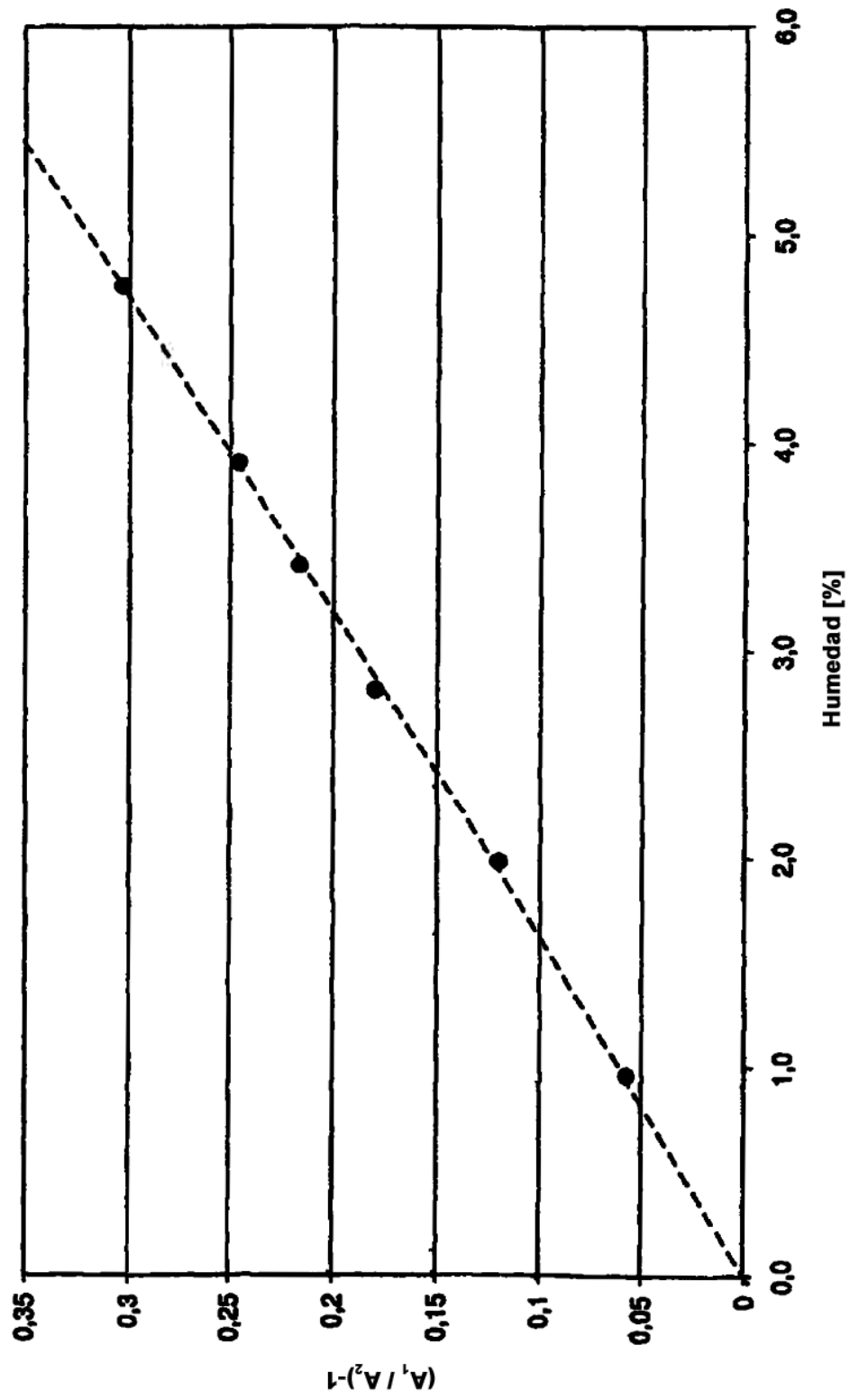


Fig. 11