



(19) Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2004 034 083 A1 2006.02.09

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2004 034 083.8

(22) Anmeldetag: 15.07.2004

(43) Offenlegungstag: 09.02.2006

(51) Int Cl.⁸: G01B 7/06 (2006.01)

G01R 27/26 (2006.01)

G01R 27/02 (2006.01)

(71) Anmelder:

Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:

Hachtel, Hansjoerg, 71287 Weissach, DE; Meyer,
Stefan, 71701 Schwieberdingen, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 198 20 546 C1

DE 38 15 009 A1

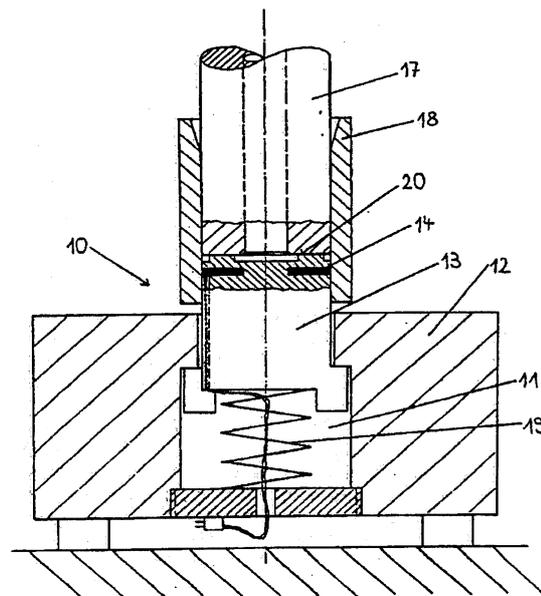
WO 97/23 762 A2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur berührungsfreien Bestimmung einer Schichtdicke durch Widerstands- und Induktivitätsmessung einer Spulensule**

(57) Zusammenfassung: Bei einem Verfahren zur berührungsfreien Bestimmung einer Dicke einer Schicht (20) aus elektrisch leitendem Material eines Bauteils (17) wird ein Sensor, der aus einem Spulenkörper (13) und einer Spule (14) besteht, in die Nähe des zu messenden Bauteils (17) positioniert. Das Verfahren beruht auf einer Kombination von Induktiv- und Wirbelstromprinzip. Mehrere Mess- und Auswerteschritte, bei denen die Spule (14) mit einer Wechselstromfrequenz f beaufschlagt und ihre Induktivitäts- und Widerstandswerte ausgewertet werden, führen zur Bestimmung der Dicke der Schicht (20). Dabei wird der Abstand zwischen dem Spulenkörper (13), und somit der Spule (14), und dem Bauteil (17) aus dem Widerstandswert R der mit der Wechselstromfrequenz f beaufschlagten Spule (14) abgeleitet.



Beschreibung

Stand der Technik

[0001] Die Erfindung geht von dem aus DE 196 52 750 C2 bekannten Verfahren zur Bestimmung einer Dicke einer Schicht aus elektrisch leitendem Material, insbesondere einer Chromschicht, aus. Das Verfahren beruht auf einer Kombination von Induktiv- und Wirbelstromprinzip. Zur Durchführung des Messverfahrens wird ein Sensor, der aus einer Spule und einem Spulenkörper besteht, mit Hilfe einer Feder gegen die Oberfläche eines zu messenden Bauteils gedrückt. Mehrere Mess- und Auswerteschritte, bei denen die Spule von einem Wechselstrom durchflossen und ihre Induktivitätsänderung ausgewertet wird, führen zur Bestimmung der Dicke der Schicht. Dabei auftretende Messfehler, verursacht beispielsweise durch Schwankungen der stofflichen Beschaffenheit des Bauteils oder durch Verschmutzung oder Abrieb bewirkte Unterschiede des Abstandes zwischen der Spule und dem Bauteil, können durch die Einführung eines Normwertes vermindert werden. Auch wird dadurch eine eindeutige Zuordnung zwischen dem gemessenen Induktivitätswert und der entsprechenden Schichtdicke gewährleistet.

Aufgabenstellung

Vorteile der Erfindung

[0002] Das erfindungsgemäße Verfahren zur Bestimmung einer Dicke einer Schicht aus elektrisch leitendem Material mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs hat den Vorteil, dass eine berührungsfreie Messung ermöglicht wird. Dadurch wird ein für das Messobjekt schonendes, schnelles Verfahren bereitgestellt. Zudem wird die Gefahr einer Sensor- und/oder Oberflächenbeschädigung eliminiert.

[0003] Weiter wird bei bisherigen Kontaktmessungen das Messobjekt mit der zu untersuchenden Schicht auf einem federnd gelagerten Spulenkörper aufgesetzt und gegen diesen angedrückt, um eine planparallele Kontaktierung des Messobjektes mit dem Spulenkörper zu gewährleisten. Dabei werden die zur Spule führenden Spulen-Anschlußdrähte unweigerlich mitbewegt und können daher nach wiederholten Messungen durch eine starke Abnutzung brechen. Bei der erfindungsgemäßen, berührungsfreien Messung wird eine Bewegung des Spulenkörpers und somit ein Bruch der Spulen-Anschlußdrähte vermieden.

[0004] Bei einer berührungsfreien Messung kann grundsätzlich eine nicht zu vernachlässigende Fertigungstoleranz des Messobjektes problematisch werden. Aufgrund einer Fertigungstoleranz ungleich Null schwankt möglicherweise der Luftspalt, d. h. der Ab-

stand zwischen dem Spulenkörper, und damit der Spule und dem Messobjekt, von Messung zu Messung. Eine daraus folgende Verfälschung der Messergebnisse wird durch das erfindungsgemäße Verfahren vermieden, so dass das Messobjekt nicht bei jedem Messzyklus gegen den Spulenkörper gedrückt werden muss, um eine Schwankung des Abstandes zu vermeiden.

[0005] Dabei weist das Verfahren auch alle Vorzüge auf, die das Verfahren aus dem Stand der Technik bietet. Insbesondere in einer Massenproduktion hergestellte beschichtete Teile können in einem kontinuierlich durchlaufenden Meßverfahren überprüft werden.

[0006] Durch die in den Unteransprüchen und in der Beschreibung aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen des im unabhängigen Anspruch angegebenen Verfahrens möglich.

Ausführungsbeispiel

Zeichnung

[0007] Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert.

[0008] Die [Fig. 1](#) zeigt einen schematischen Aufbau der Meßvorrichtung.

[0009] In der [Fig. 2](#) ist der Verlauf der Induktivität L der Meßspule über die Dicke a der zu bestimmenden Schicht bei unterschiedlichen Abständen und bei unterschiedlicher stofflicher Beschaffenheit α bzw. β des sich unter der zu bestimmenden Schicht befindlichen Materials dargestellt.

[0010] In der [Fig. 3](#) ist das Verhältnis der in [Fig. 2](#) verwendeten unterschiedlichen Abstände zwischen der Meßspule und dem Meßobjekt dargestellt.

[0011] [Fig. 4](#) zeigt den Verlauf der Spuleninduktivität L in Abhängigkeit der eingesetzten Frequenz bei unterschiedlichen Luftspalten (Abstand Spulenkörper-unbeschichtetes Messobjekt).

[0012] [Fig. 5](#) zeigt den Verlauf des Spulenwiderstands R in Abhängigkeit der eingesetzten Frequenz bei unterschiedlichen Luftspalten (Abstand Spulenkörper-unbeschichtetes Messobjekt).

[0013] [Fig. 6](#) zeigt eine Abstandskennlinie, mit der ein Widerstandswert R in einen Abstandswert d umgewandelt werden kann.

[0014] [Fig. 7](#) zeigt eine Justierkurvenschar mit mehreren Justierkurven, wobei jede einzelne für ei-

nen konkreten, voneinander unterschiedlichen Abstand d gilt.

Beschreibung des Ausführungsbeispiels

[0015] Das erfindungsgemäße Meßverfahren beruht auf dem sogenannten Induktiv-Wirbelstrommessprinzip. Eine mögliche Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens ist aus DE 196 52 750 C2 bekannt. In der [Fig. 1](#) ist ein dafür verwendeter Sensor **10** konstruktiv dargestellt. In dieser Darstellung ist ein Bauteil **17** auf einem Spulenkörper **13** aufgesetzt, hingegen ist beim erfindungsgemäßen Verfahren eine berührungsfreie Messung möglich. Der Sensor **10** ist in der Ausnehmung **11** eines Grundkörpers **12** angeordnet und besteht aus einem Spulenkörper **13** auf dem eine von einem Wechselstrom durchflossene Spule **14** angebracht ist. Die Spule **14** kann zum Beispiel als Flachspule oder Ringspule ausgebildet sein. Der Spulenkörper **13** besteht vorzugsweise aus elektrisch nicht leitendem und nicht ferromagnetischem Material, zum Beispiel Kunststoff, und wird nahezu reibungsfrei in der Ausnehmung **11** geführt. Das zu überwachende Bauteil **17** ist in einen Führungskörper **18** eingebracht, der das Bauteil **17** und die Spule **14** zueinander positioniert. Mit Hilfe einer Feder **19** wird der Spulenkörper **13** und somit die Spule **14** gegen die Oberfläche des Bauteils **17** gedrückt. Die Oberfläche weist die zu bestimmende Schicht auf. Beim Bauteil **17** kann es sich zum Beispiel um den Stutzen eines Einspritzventils handeln, wobei die Schicht **20** dann eine Chromschicht darstellt. Fließt durch die Spule **14** ein Wechselstrom, so wird ein magnetisches Wechselfeld erzeugt, das sowohl die Chromschicht als auch die darunterliegende Materialschicht aus ferromagnetischem Material des Bauteils **17** durchdringt. In der Chromschicht wirkt dann nur der Wirbelstromeffekt, während im ferromagnetischen Material des Bauteils **17** der Induktiv- und Wirbelstromeffekt wirksam sind. Im folgenden werden nun die jeweiligen Meßeffekte einzeln erläutert, die auftreten würden, wenn das jeweilige andere Teil nicht vorhanden wäre. Wird die Spule **14** von einem Wechselstrom durchflossen und erfaßt das magnetische Wechselfeld der Spule **14** nur ein elektrisch gut leitendes aber nicht ferromagnetisches Material, d. h. nur die Chromschicht würde vom magnetischen Wechselfeld der Spule **14** erfaßt, so wirkt nur der sog. Wirbelstromeffekt. Aufgrund der sich in dem elektrisch gut leitenden, aber nicht ferromagnetischen Material ausbildenden Wirbelströme ergibt sich eine Verminderung der Induktivität der Spule **14**.

[0016] Im folgenden wird nun die Wirkung des magnetischen Feldes der von einem Wechselstrom durchflossenen Spule **14** auf das ihr gegenüberliegende ferromagnetische Material, d. h. auf das Material des Bauteils **17** beschrieben. Das magnetische Wechselfeld der von dem Wechselstrom durchflossenen Spule **14** erfaßt das Material des Bauteils **17**. Es

sei darauf hingewiesen, daß bei elektrisch leitendem und ferromagnetischem Material sowohl der ferromagnetische Effekt als auch der Wirbelstromeffekt wirkt. Während der Wirbelstromeffekt eine Verminderung der Induktivität der Meßspule **14** hervorruft, bewirkt der ferromagnetische Effekt, in dieser Schrift auch Induktiv-Effekt genannt, eine Erhöhung der Induktivität der Meßspule **14**. Welcher von beiden Effekten überwiegt, ist primär von der Frequenz des Wechselstroms, der die Spule **14** durchfließt, und von der Stoffbeschaffenheit des Bauteils **17** abhängig. Überträgt man diese beiden Meßeffekte auf das Bauteil **17** mit der Chromschicht, so läßt sich feststellen, daß je dicker die Chromschicht ist, desto schwächer bildet sich das Magnetfeld aus und damit ist die Induktivität der Spule **14** schwächer. In der [Fig. 2](#) ist mit α_1 eine entsprechende Meßkurve dargestellt, die den abnehmenden Verlauf der Induktivität der Meßspule **14** über die zunehmende Dicke a der Chromschicht darstellt.

[0017] Der Verlauf der Meßkurve der Induktivität L über der Schichtdicke a hängt aber von der stofflichen Beschaffenheit des Bauteils **17**, d. h. zum Beispiel von dem elektrischen Widerstand, der Permeabilität des Materials und vom Abstand zwischen dem Spulenkörper **13** bzw. der Spule **14** und der Oberfläche, die gemessen werden soll, ab. Verändert sich zum Beispiel bedingt durch Verschmutzungen oder durch Abnutzung des Spulenkörpers **13** der Abstand zwischen der Meßspule **14** und der Chromschicht, so ergeben sich unterschiedliche Kennlinien des Verlaufs der Induktivität L über der Schichtdicke a . In der [Fig. 2](#) sind hier verschiedene Beispiele dargestellt. Die Kennlinien α_1 , α_2 , α_3 und α_4 stellen hierbei den Verlauf der Induktivität L über der Schichtdicke a bei unterschiedlichem Abstand zwischen der Meßspule **14** und der zu überwachenden Chromschicht aber bei gleicher stofflicher Beschaffenheit des Bauteils **17** dar. In der [Fig. 3](#) ist hierbei die Größe des Abstandes α zwischen der Spule **14** und der zu überwachenden Chromschicht dargestellt. Es ist ersichtlich, daß der Abstand von α_1 zu α_4 immer größer wird. Die Kennlinien β_1 bis β_4 bedeuten wiederum eine Variation des Abstandes zwischen der Meßspule und der zu überwachenden Chromschicht bei einer zweiten stofflichen Beschaffenheit des Bauteils **17**. Aus dem Diagramm nach der [Fig. 2](#) ist erkenntlich, daß einem gemessenen Induktivitätswert L eine Vielzahl möglicher Schichtdicken zugeordnet werden kann.

[0018] Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, aus den ermittelten Induktivitätswerten eine Normierung durchzuführen, die einen eindeutigen zuordbaren Meßwert liefert und die oben beschriebenen Messfehler weitgehend vermindert. Insgesamt werden hierfür drei Messungen durchgeführt: Jeweils eine Vor- und Nachmessung mit dem Messobjekt und eine Messung zur Normierung ausschliesslich gegenüber einer Schicht aus dem elektrisch leitenden

Material. Die Messung für die Normierung muss nicht für jedes Exemplar durchgeführt werden. Es reicht im Prinzip stattdessen aus, eine Messung für die Normierung nur bei einem Sensorwechsel durchzuführen und gegebenenfalls die Messanlagen zeitlich intervallartig abzugleichen.

[0019] Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht nun auch eine berührungslose Messung. Ein grundsätzliches Problem bei einer berührungsfreien Messung ist die Schwankung des Abstands zwischen dem Spulenkörper **13**, und damit der Spule **14**, und dem Messobjekt. In dieser Schrift wird der Abstand Spulenkörper **13** – Messobjekt auch mit der Kurzform „Abstand“ oder „Luftspalt“ bezeichnet. Zur Schwankung des Abstands trägt die von Null verschiedene Fertigungstoleranz des Bauteils als Messobjekt bei. In der Praxis beträgt die Fertigungstoleranz beispielsweise bei Einspritzventil-Stutzen 0,2 mm. Unterstellt man der Messanordnung eine Mindesttoleranz von 0,1 mm, dann kann der Abstand, d. h. der Luftspalt zwischen dem Spulenkörper **13** und dem Bauteil **17**, von einem Exemplar zum nächsten von 0,1 mm bis 0,3 mm schwanken. Der minimale Abstand beträgt hier also 0,1 mm und der maximale Abstand 0,3 mm. Wird zur berührungsfreien Bestimmung einer Schichtdicke das Verfahren nach den aus dem Stand der Technik bekannten Mess- und Auswerteschritten durchgeführt, dann können die oben ausgeführten Abstandsschwankungen bei günstigen Messbedingungen nur geringfügig die Messgenauigkeit verschlechtern. Allerdings muss die Messung zur Normierung bei jeder Messung, einschliesslich der Vor- und Nachmessung, zusätzlich durchgeführt werden. Mit der nun folgenden Erläuterung der Widerstands- und Induktivitäts-Messmethode wird aufgezeigt, wie die Schichtdicke trotz schwankendem Luftspalt genügend genau bestimmt werden kann, ohne dabei bei jedem Messzyklus ein Normierteil am Sensor zu positionieren und eine Messung zur Normierung durchführen zu müssen. Statt wie nach bisherigem Stand der Technik zur Bestimmung einer Schichtdicke nur Induktivitätswerte der Spule **14** heranzuziehen, wird vorgeschlagen, auch ihren Widerstandswert zu messen und auszuwerten.

[0020] Das erfindungsgemäße Verfahren zur Bestimmung der Dicke einer Schicht wird, wie aus dem Stand der Technik bekannt, in mehreren Mess- und Auswerteschritten durchgeführt. Vor der Beschichtung des Bauteils **17** wird in einer sog. Vormessung ein Induktivitätswert $L_{0,d,f}$ der Spule **14** ermittelt. Hierbei bedeutet der erste Index „0“ zum Induktivitätswert $L_{0,d,f1}$ die Dicke der Beschichtung (0 = unbeschichtet), der zweite Index „d“ der aktuelle Wert des Abstandes zwischen dem Spulenkörper **13** und dem Bauteil **17** (d noch zu bestimmen), und schliesslich der dritte Index „f“ die Wechselstromfrequenz f, mit der die Spule **14** beaufschlagt wird (f wird eingestellt). Während der Messung ist die Spule **14** gerichtet auf die noch un-

beschichtete, der Spule **14** zugewandten Oberfläche (Meßfläche) des Bauteils **17**, wobei sich zwischen dem Spulenkörper **13** und der Oberfläche des Bauteils **17** ein Abstand d herausbildet. Der genaue Wert d des Abstandes ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt und muss daher noch ermittelt werden. Es erfolgt eine Messung nur gegenüber dem Material des unbeschichteten Bauteils **17**. Die auf die Spule **14** beaufschlagte Wechselstromfrequenz f ist eine Frequenz aus dem Hochfrequenz-Bereich, ein geeigneter Wert ist beispielsweise 4 MHz. Die Größe des Induktivitätswerts $L_{0,d,f}$ hängt weiter von der Beschaffenheit des Bauteils **17** ab, insbesondere von dessen magnetischen und elektrischen Eigenschaften. Diese Beschaffenheit des Bauteils **17** kann in einer Serienfertigung schwanken. Deshalb ist der Induktivitätswert $L_{0,d,f}$ zu Beginn des Messverfahrens für jedes einzelne Bauteil **17** zu ermitteln und auch zuordbar in einem Datenspeicher abzuspeichern.

[0021] Die Vormessung der Spuleninduktivität dient zur Ermittlung eines Normwertes. Zusätzlich müssen bei einer berührungsfreien Bestimmung der Schichtdicke a eine weitere Messung durchgeführt werden, um den Abstand d zwischen dem Spulenkörper **13** und dem Bauteil **17** ermittelt zu können. Diese weitere Messung kann durch eine zusätzliche Induktivitätsmessung der Spule **14** durchgeführt werden, wobei die Spule **14** mit einer zweiten, von der ersten verschiedenen Wechselstromfrequenz f2 beaufschlagt wird. Die dadurch ermittelte Spuleninduktivität kann dann über eine Kennzahlbildung und eine zuvor aufgenommene Kennlinie in einen Abstandswert d überführt werden. Jedoch kann, wie das Diagramm in der [Fig. 4](#) zeigt, der Einsatz dieser Methode für einen bestimmten Bereich aus dem Frequenzspektrum nicht zu einem eindeutigen Ergebnis führen. In diesem Diagramm sind die gemessenen Induktivitätswerte der Spule **14** in Abhängigkeit der eingesetzten Wechselstromfrequenz f2 aufgetragen, die sich bei Messungen unbeschichteter Bauteile **17** ergeben. Der Verlauf der Kurve 1 wurde bei einem Abstand d = 0 mm aufgenommen, d. h. der Spulenkörper **13** wurde auf dem Bauteil **17** aufgesetzt ohne einen Luftspalt dazwischen. Bei den nächsten Kurven 2, 3, 4 und 5 nahm der Abstand um jeweils 0,1 mm zu. Bei einer tiefen Wechselstromfrequenz f2, beispielsweise bei 100 kHz in der [Fig. 4](#), ist der Induktivitätswert dann am höchsten, wenn der Spulenkörper **13** auf dem Bauteil **17** aufgesetzt wird. Je weiter sich die Spule **14** vom Bauteil **17** entfernt, desto geringerer werden die Werte. Bei hohen Wechselstromfrequenzen f2, beispielsweise bei 5 MHz in der [Fig. 4](#), verhält es sich genau umgekehrt.

[0022] Dazwischen gibt es einen Frequenzbereich, in diesem Beispiel etwa bei 3 bis 4 MHz, in dem die Abstandsänderungen kaum unterschiedliche Induktivitätswerte der Spule **14** bewirken. Daher kann eine sichere Abstandsbestimmung mit diesen Wechsel-

stromfrequenzen nicht durchgeführt werden. Die Wechselstromfrequenz f_2 sollte folglich besser eine Frequenz aus dem Niederfrequenz-Bereich, beispielsweise 100 kHz, sein. Es wird darauf hingewiesen, dass der Frequenzbereich, in dem die Abstandsänderungen kaum unterschiedliche Induktivitätswerte der Spule **14** bewirken, abhängig vom Grundmaterial des Bauteils **17** und der Spulenform ist.

[0023] Statt einer weiteren Induktivitätsmessung der Spule **14** zur Abstandsbestimmung wird im erfindungsgemäßen Verfahren vorgeschlagen, den Wechselstromwiderstandswert R der Spule **14** zu messen. Wie in der [Fig. 4](#) repräsentiert die Kurve 1 in der [Fig. 5](#) das Messergebnis bei einem Abstand $d = 0$ mm, und die weiteren Kurven 2, 3, 4 und 5 bei einer Abstandszunahme um jeweils 0,1 mm. Die Kurven 1 bis 5 zeigen in der [Fig. 5](#) den Verlauf des Widerstandswertes R der Spule **14**, die sich bei Messungen unbeschichteter Bauteile **17** ergeben. Auch im MHz-Bereich der eingesetzten Wechselstromfrequenz f_2 zeigen die Widerstandswerte R der Spule **14** eine ausreichende Empfindlichkeit, d. h. eine sichere Ableitung des Abstandes d aus dem gemessenen Widerstandswert R ist möglich. Trägt man den Widerstandswert R über den Abstand d auf, wobei die Spule **14** mit einer Wechselstromfrequenz von $f = 4$ MHz beaufschlagt wurde, so erhält man wie in [Fig. 6](#) erkennbar eine eindeutige Kennlinie. Vorteilhaft erfolgen die Vormessung der Spuleninduktivität zur Normwertermittlung und die Widerstandsmessung zur Abstandsermittlung praktisch zeitgleich, da moderne Messgeräte bei einer Spulenmessung beide Größen zusammen erfassen.

[0024] Aus der Messung des Widerstandswertes R der Spule **14** wird mit Hilfe der zuvor aufgenommenen Kennlinie, wie in [Fig. 6](#) dargestellt, ein Abstandswert d abgeleitet und abgespeichert.

[0025] Anschließend wird nun das Bauteil **17** in einer entsprechenden Beschichtungsanlage mit einer Chromschicht versehen. Danach erfolgt eine dritte Messung, d. h. eine sog. Nachmessung, die an derselben Stelle des Bauteils **17** wie die oben erwähnten Vormessungen durchgeführt wird. Die Messvorrichtung muss dabei so beschaffen sein, dass der Abstand d bei der Vor- und Nachmessung gleich groß ist. Dabei ergibt sich ein Induktivitätswert $L_{x,d,f}$ der Meßspule **14**, wobei der erste Index „x“ für den zu bestimmenden Wert der Schichtdicke a , der zweite Index „d“ für den Abstand zwischen dem Spulenkörper **13** und dem beschichteten Bauteil **17** und der dritte Index „f“ für die auf die Spule **14** beaufschlagte Wechselstromfrequenz f steht. Vor- und Nachmessung erfolgen mit der gleichen Frequenz f , beispielsweise 4 MHz. Die Größe des Induktivitätswerts $L_{x,d,f}$ wird u. a. von der Dicke der Chromschicht und von der stofflichen Beschaffenheit des Bauteils **17** bestimmt. Es ist sicherzustellen, dass beide ermittelten

Induktivitätswerte $L_{0,d,f}$ bzw. $L_{x,d,f}$ jeweils eindeutig demselben Bauteil **17** zuzuordnen sind.

[0026] Diese beiden Induktivitätswerte $L_{0,d,f}$ bzw. $L_{x,d,f}$ werden nun mit Hilfe eines Algorithmuses in einen Normwert umgeformt, d. h. in eine dimensionslose Kennzahl, die einer entsprechenden Schichtdicke a zuordbar ist. Dieser Normwert sei hier mit Messwert M_e bezeichnet. Um diese Normwertbildung durchführen zu können, müssen die Induktivitätswerte $L_{\infty,AB,f}$ und $L_{0,AB,f}$ ermittelt werden bzw. sind diese Werte bereits gemessen und abgespeichert. Den Induktivitätswert $L_{\infty,AB,f}$ erhält man, wenn an einem Messobjekt eine Messung ausschließlich gegenüber einer Chromschicht durchgeführt wird, wobei der Wert des Abstands d zwischen dem Spulenkörper **13** und dem Messobjekt AB beträgt. Die Oberfläche des Messobjektes muss dabei eine so dicke Chromschicht aufweisen, dass sie praktisch das gesamte Magnetfeld der Spule **14** abschirmt, so dass im ferromagnetischen Grundstoff des Messobjektes weder der induktive Effekt noch der Wirbelstromeffekt sich auswirken kann. Gegebenenfalls könnte beim Messobjekt an Stelle von Chrom auch ein anderer elektrisch leitender, jedoch nicht ferromagnetischer Stoff als Ersatz verwendet werden. Den Induktivitätswert $L_{0,AB,f}$ erhält man, wenn eine Messung ausschließlich gegenüber an einem Messobjekt aus ferromagnetischen Material durchgeführt wird, wobei der Wert des Abstands d zwischen dem Spulenkörper **13** und dem Messobjekt AB beträgt. Für beide Induktivitätswerte $L_{\infty,AB,f}$ und $L_{0,AB,f}$ wird die hochfrequente Wechselstromfrequenz f eingesetzt. Entsprechend der Gleichung 1 wird nun der Normwert oder Messwert M_e ermittelt:

$$M_e = B \cdot \frac{L_{x,d,f} - L_{0,d,f}}{L_{\infty,AB,f} - L_{0,AB,f}}, \quad (1)$$

wobei

$L_{x,d,f}$	= Induktivitätswert der Nachmessung
$L_{0,d,f}$	= Induktivitätswert der Vormessung
$L_{\infty,AB,f}$	= Induktivitätswert der Spule 14 bei einer Messung ausschließlich gegenüber einem Messobjekt aus dem elektrisch leitenden Material, wobei der Wert des Abstands zwischen dem Spulenkörper 13 und dem Messobjekt AB beträgt
$L_{0,AB,f}$	= Induktivitätswert der Spule 14 bei einer Messung ausschließlich gegenüber einem Messobjekt aus dem ferromagnetischen Material, wobei der Wert des Abstands zwischen dem Spulenkörper 13 und dem Messobjekt AB beträgt
B	= konstanter Faktor

[0027] Der konstante Faktor B kann eine beliebige positive Zahl sein, praktischerweise ist B ein Vielfaches von 10, beispielsweise 1000. Als ein möglicher Wert AB des Abstands d zwischen dem Spulenkörper

13 und dem Messobjekt kann der halbe Wert der Summe vom minimalen und maximalen Abstand zwischen dem Spulenkörper **13** und dem Messobjekt ausgewählt werden. Ein typischer Wert aus der Praxis beträgt $AB = 0,2$ mm. Mit diesen konkreten Werten für den konstanten Faktor B und AB und den gemessenen Induktivitätswerten werden nach der oben stehenden Gleichung (1) – im Gegensatz zum bisherigen Messverfahren mit nur einer Justierkurve aus dem Stand der Technik – mehrere Justierkurven aufgenommen, die jeweils für einen konkreten, voneinander unterschiedlichen Abstand d gilt. Als Parameter dient dabei der Abstand. Die Gesamtheit der beispielsweise zwölf Justierkurven bildet eine Justierkurvenschar, die in [Fig. 7](#) dargestellt wurde. Jede einzelne Justierkurve repräsentiert einen bestimmten Abstandswert und zeigt für diesen Abstandswert den Verlauf der Schichtdicke a über einen Bereich der Normwerte. Bei der Umwandlung des Messwertes M_e in einen Schichtdickenwert a wird natürlich diejenige Justierkurve ausgewählt, deren Abstandsparameterwert die geringste Abweichung zum ermittelten Wert des Abstandes d aufweist. Im Idealfall ist die geringste Abweichung gleich Null.

[0028] Dieses Messverfahren kann angewandt werden, wenn die elektrischen und magnetischen Eigenschaften der zu messenden Teile – exemplarbezogen – genügend konstant sind. Es empfiehlt sich, diese Konstanz zu überprüfen.

[0029] Selbstverständlich muss bei Schichtdickenmessungen im Hochfrequenz-MHz-Bereich die Messanlage so ausgelegt sein, dass keine Verfälschung des Messsignals entsteht, wenn diese berührt wird (Erdungsproblematik ist zu beachten). Diese Anmerkung betrifft auch das in DE 196 52 750 C2 beschriebene Verfahren.

Patentansprüche

1. Verfahren zur berührungsfreien Bestimmung einer Dicke einer Schicht (**20**) aus elektrisch leitendem Material, die auf einem Bauteil (**17**) aus ferromagnetischem Material aufgebracht ist, wobei mit Hilfe mindestens einer von einem Wechselstrom durchflossenen und auf einem Spulenkörper (**13**) angebrachten Meßspule (**14**), deren Induktivitäts- und Widerstandswerte ausgewertet wird, folgende Meßschritte ablaufen:

– Ermittlung des Induktivitätswertes $L_{0,d,f}$ der Spule (**14**) bei einer Messung ausschließlich gegenüber einem Bauteil (**17**) als Messobjekt aus dem ferromagnetischen Material, wobei die Spule (**14**) mit einer Wechselstromfrequenz f beaufschlagt wird und der Abstand zwischen dem Spulenkörper (**13**) und dem Messobjekt d beträgt

[L-Vormessung, zur Normwertermittlung]

– Ermittlung des Widerstandswertes $R_{0,d,f}$ der Spule (**14**) bei einer Messung ausschließlich gegenüber

dem Bauteil (**17**) als Messobjekt aus dem ferromagnetischen Material, wobei die Spule (**14**) mit der Wechselstromfrequenz f beaufschlagt wird und der Abstand zwischen dem Spulenkörper (**13**) und dem Messobjekt d beträgt

[R-Vormessung, zur Abstandsermittlung]

– Umwandlung des Widerstandswertes $R_{0,d,f}$ mit Hilfe einer Abstandskennlinie in den Wert des Abstandes d [Abstandsbestimmung]

– Ermittlung des Induktivitätswertes $L_{x,d,f}$ der Spule (**14**) bei einer Messung gegenüber der zu bestimmenden Schicht (**20**), wobei die Spule (**14**) mit der Wechselstromfrequenz f beaufschlagt wird und der Abstand zwischen dem Spulenkörper (**13**) und dem beschichteten Bauteil (**17**) d beträgt

[L-Nachmessung, zur Normwertermittlung]

– Umwandlung der ermittelten Induktivitätswerte $L_{0,d,f}$ und $L_{x,d,f}$ in einen dimensionslosen Messwert M_e [Normwertbestimmung]

– Umwandlung des Messwertes M_e mit Hilfe einer Justierkurvenschar unter Berücksichtigung des ermittelten Wertes des Abstandes d in einen Schichtdickenwert a

[Schichtdickenbestimmung]

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der dimensionslose Messwert M_e mit Hilfe der Gleichung (1) ermittelt wird:

$$M_e = B \cdot \frac{L_{x,d,f} - L_{0,d,f}}{L_{\infty,AB,f} - L_{0,AB,f}}, \quad (1)$$

wobei

$L_{x,d,f}$ = Induktivitätswert der Nachmessung

$L_{0,d,f}$ = Induktivitätswert der Vormessung

$L_{\infty,AB,f}$ = Induktivitätswert der Spule (**14**) bei einer Messung ausschließlich gegenüber einem Messobjekt aus dem elektrisch leitenden Material, wobei der Wert des Abstandes d zwischen dem Spulenkörper (**13**) und dem Messobjekt AB beträgt

$L_{0,AB,f}$ = Induktivitätswert der Spule (**14**) bei einer Messung ausschließlich gegenüber einem Messobjekt aus dem ferromagnetischen Material, wobei der Wert des Abstandes d zwischen dem Spulenkörper (**13**) und dem Messobjekt AB beträgt

B = konstanter Faktor

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der konstante Faktor B 1000 beträgt.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Wechselstromfrequenz f eine Frequenz aus dem Hochfrequenz-Bereich, beispielsweise 4 MHz, ist.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass als Wert AB des Abstandes d der halbe Wert der Summe vom minimalen und maximalen Abstand zwischen dem Spulenkörper

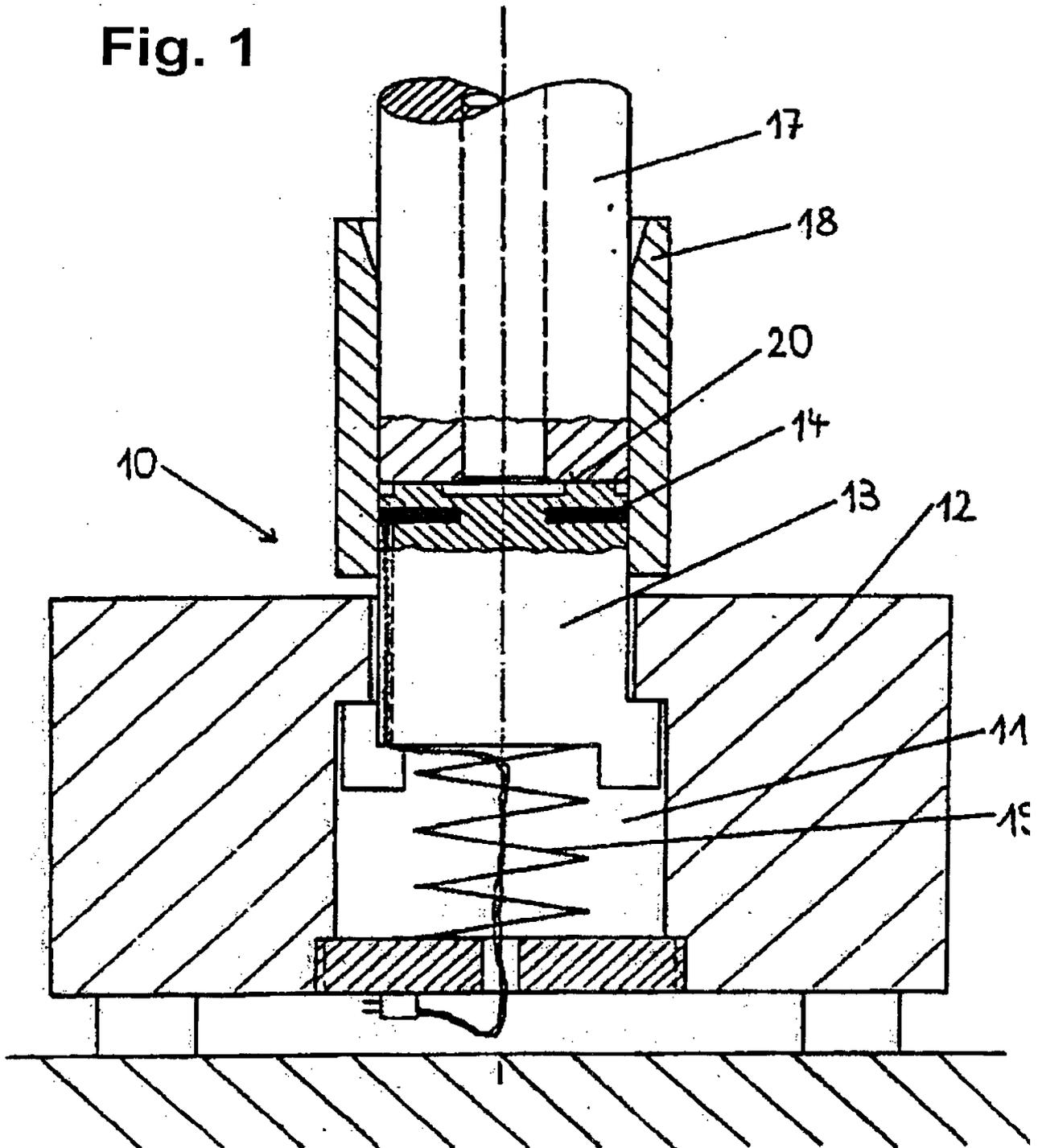
(13) und dem Messobjekt ausgewählt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Justierkurvenschar mehrere Justierkurven aufweist, die jeweils für einen konkreten, voneinander unterschiedlichen Abstand d gilt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass aus der Justierkurvenschar diejenige Justierkurve zur Umwandlung des Messwertes M_e in Schichtdickenwert a ausgewählt wird, deren Abstandsparameterwert die geringste Abweichung zum ermittelten Abstand d aufweist.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Fig. 1



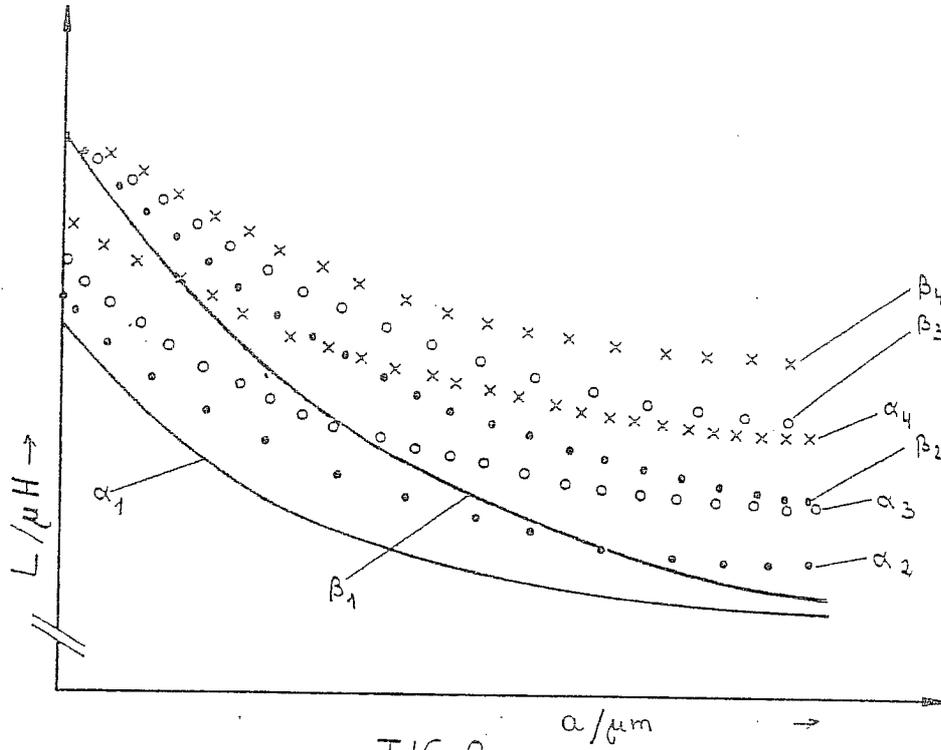


FIG. 2

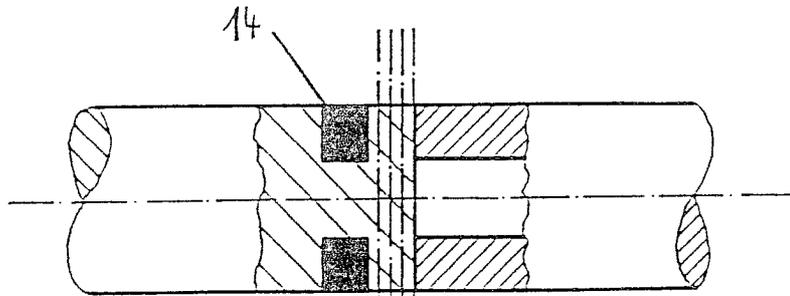


FIG. 3

$\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4$
 $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3 < \beta_4$

Fig. 4

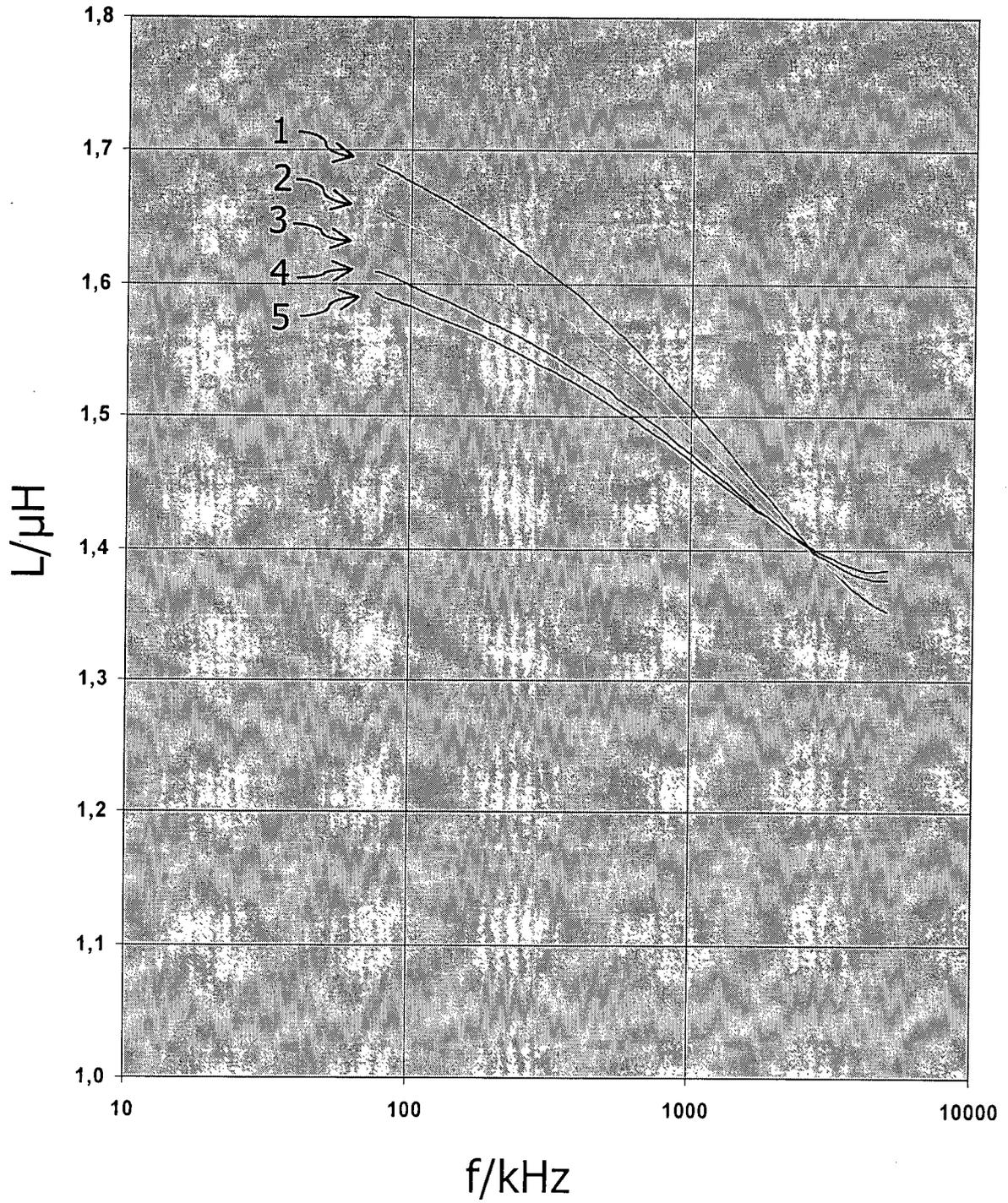


Fig. 5

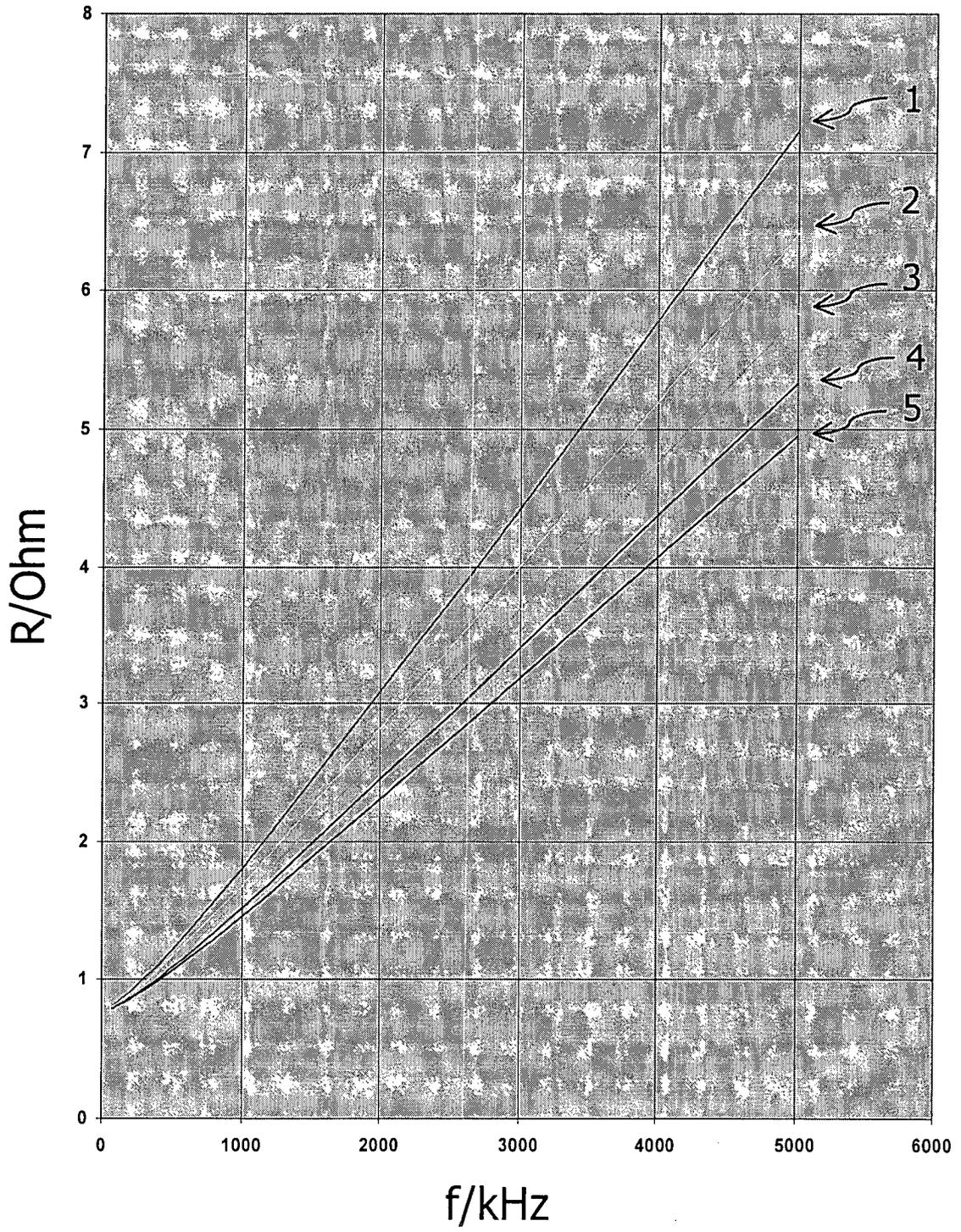


Fig. 6

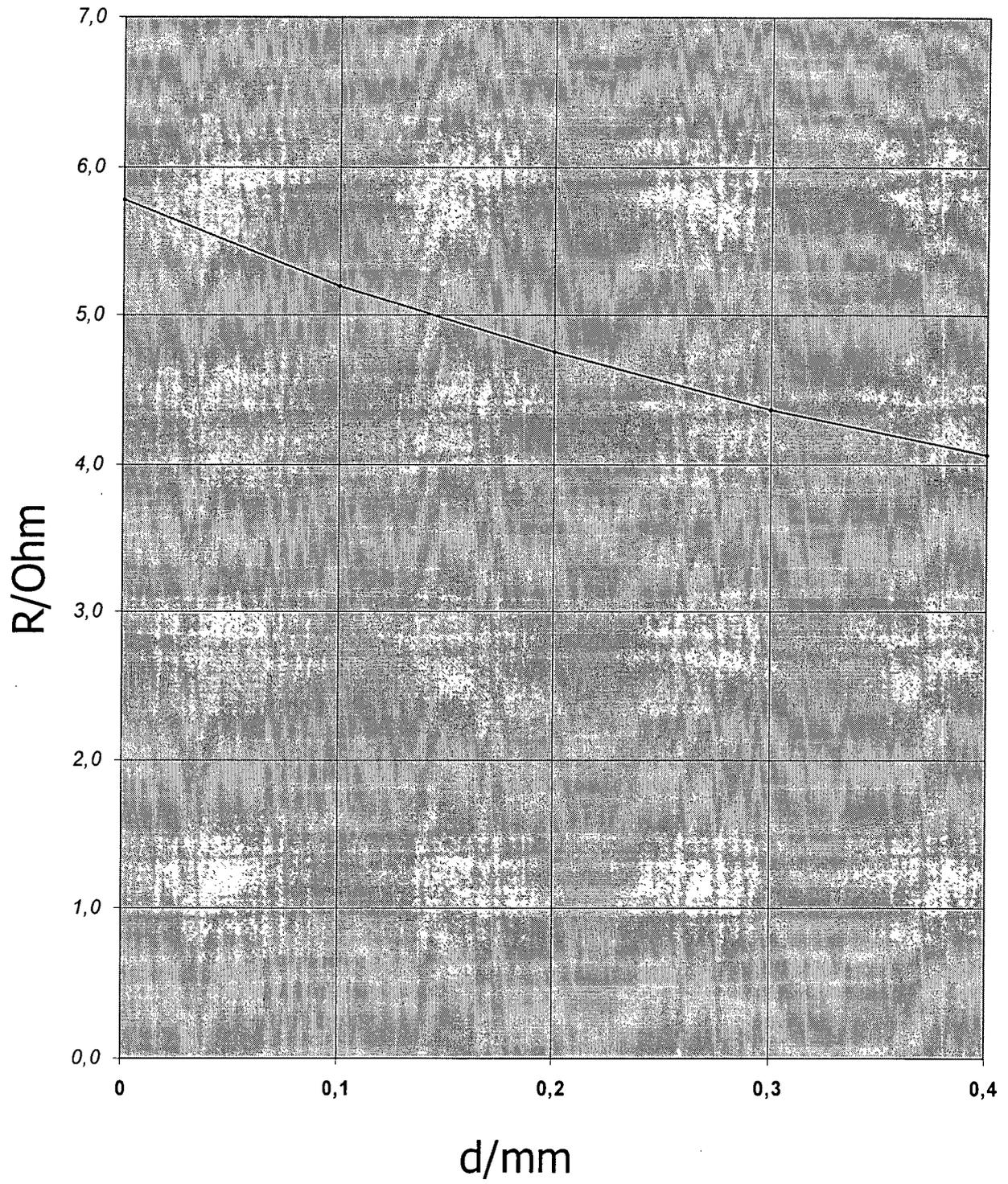


Fig. 7

