

Urkunde

über die Erteilung des
Patents Nr. 10 2015 106 072

Bezeichnung:

Verfahren, Auswertalgorithmus und Vorrichtung zur elektrischen
Charakterisierung von Kabelferriten

IPC:

G01R 27/28

Inhaber/Inhaberin:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39106 Magdeburg, DE

Erfinder/Erfinderin:

Al-Hamid, Moawia, Dr., 39116 Magdeburg, DE

Tag der Anmeldung:

21.04.2015

Tag der Veröffentlichung der Patenterteilung:

29.09.2016

Die Präsidentin des Deutschen Patent- und Markenamts

Cornelia Rudloff-Schäffer

Cornelia Rudloff-Schäffer

München, 29.09.2016





(10) **DE 10 2015 106 072 B3** 2016.09.29

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2015 106 072.8**
(22) Anmeldetag: **21.04.2015**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **29.09.2016**

(51) Int Cl.: **G01R 27/28 (2006.01)**
G01R 35/00 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39106
Magdeburg, DE**

(72) Erfinder:
Al-Hamid, Moawia, Dr., 39116 Magdeburg, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**Deutsche Norm DIN EN 55017 (CISPR 17:2011):
Verfahren zur Messung der Entstöreeigenschaften
von passiven EMV-Filtern, VDE Verlag Berlin,
April 2012, S. 1-62**

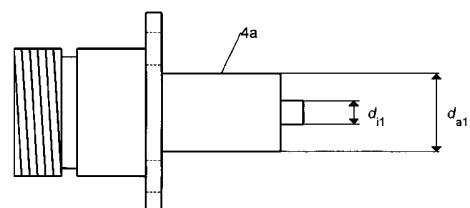
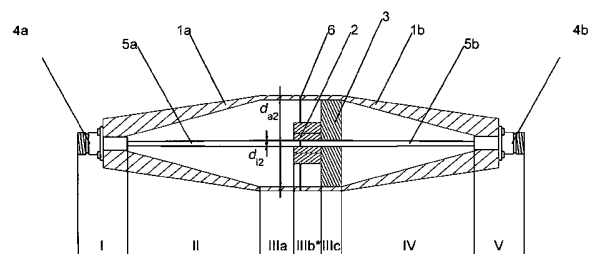
**KNAUFF, Uwe: Interner Report, Otto-von-
Guericke Universität, Magdeburg, 2007, 64 Seiten**

**OSSEVORTH, Fabian [et al.]: Analytische
Beschreibung von Dämpfungsferriten auf
Leitungen. In: Konferenzband der EMV Konferenz
2010, VDE Verlag Berlin Offenbach, 9.-11. März
2010, S. 201-208 - ISBN 978-3-8007-3206-7**

**URABE, Junichiro [et al.]: A method for
measuring the characteristics of an EMI
suppression ferrite core. In: IEEE transactions
on electromagnetic compatibility, Vol. 48, Nr. 4,
November 2006, S. 774-780**

**URABE, Junichiro [et al.]: A study of EMI
suppression characteristics of ferrite cores.
In: Konferenzband 17th International Zurich
Symposium on Electromagnetic Compatibility,
2006, S. 622-625**

(54) Bezeichnung: **Verfahren, Auswertalgorithmus und Vorrichtung zur elektrischen Charakterisierung von
Kabelferriten**



(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren, sowie einen Auswertalgorithmus zur Charakterisierung von Kabelferriten, welches einen speziell dafür angepassten Messadapter verwendet.

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren, sowie einen Auswertalgorithmus zur Charakterisierung von Kabelferriten, welches einen speziell dafür angepassten Messadapter verwendet.

[0002] Kabelferrite verschiedener Formen und aus unterschiedlichen Materialien werden häufig verwendet, um unerwünschte Störsignale auf Kabeln bzw. Leitungen zu unterdrücken. Sie wirken als breitbandiger Gleichaktfilter, ähnlich der Wirkung von Gleichaktrosseln auf einer Leiterplatte. Damit soll die Konformität elektronischer Geräte aus Sicht der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) sichergestellt werden. Damit verschiedene Ferrite miteinander verglichen werden können, sind Messdaten der elektrischen Parameter, wie der Induktivität oder dem Widerstand, notwendig. Hersteller solcher passiver Komponenten verwenden eine einfache Messprozedur, um ein Diagramm für die frequenzabhängige Impedanz des Kabelferrites in ein Datenblatt aufzunehmen. Der verwendete Messaufbau gibt aber nur einen Spezialfall für die Kabelterminierung wieder, der von den realen Anwendungen weit entfernt ist. Aus dem Datenblattdiagramm ist ableitbar, dass der jeweilige Ferrit oberhalb der Frequenz mit der maximalen Impedanz weniger wirksam für die Unterdrückung von Störsignalen ist. Diese Herangehensweise kann zu Fehlinterpretationen führen.

[0003] Die derzeit gängige Methode, Kabelferrite zu vermessen, verwendet einen Impedanzanalysator. Das Messobjekt wird dabei auf ein Stück Draht definierter Länge aufgebracht und anschließend wird die Impedanz zwischen den Drahtenden bei verschiedenen Frequenzen gemessen. Da der Ferrit nicht immer exakt konzentrisch und in der Mitte des Drahtes angeordnet werden kann, ist der Messaufbau schlecht reproduzierbar.

[0004] In [1] wurde beispielsweise nachgewiesen, dass die Wirkung eines Kabelferrites nicht durch eine reine Serienimpedanz beschrieben werden kann. Es gibt immer eine kapazitive Verkopplung mit der Umgebung des Drahtes. Diese kapazitive Impedanz hängt von der Geometrie des Messaufbaus ab und beeinflusst die effektive Dämpfung des Ferrites. Obwohl die Induktivität und der ohmsche Widerstand die dominierenden Parameter von Ferritmaterialien sind, gibt es aufgrund der Permittivität der mikroskopischen Kornstruktur auch eine kapazitive Komponente. Deshalb muss ein elektrisches Ersatzschaltbild als Vierpol betrachtet werden. Der resistive und induktive Anteil der Impedanz hängen direkt mit der (komplexen) relativen Permeabilität des Ferritmaterials zusammen.

[0005] Der in [1] entwickelte Messaufbau arbeitet ähnlich, wie der in der CISPR 17 [2] für passive Filter vorgeschlagene Messaufbau. Er besteht aus einem starren Draht zwischen zwei Metallwinkeln, die mit einer leitfähigen Platte verbunden sind. An beiden Drahtenden sind koaxialen Flanschadapter angelötet. Der Kabelferrit wird konzentrisch auf dem Innenleiter platziert. Während das eine Ende entweder mit einem Kurzschluss, einem Leerlauf oder einem 50 Ω Widerstand abgeschlossen ist, wird auf der anderen Seite der Streuparameter S_{11} gemessen. Die Ferritparameter wurden extrahiert, indem das Ferritmodell an die gemessenen Daten angepasst wurde. Bis zu 3 GHz wurden ausreichende Resultate erzielt.

[0006] In [3] wurde diese Prozedur näher untersucht und außerdem der Anpassungsalgorithmus verbessert. Dort sind analytische Lösungen für die Impedanz des Messadapters enthalten, um die Genauigkeit zu erhöhen. Der offene Messadapter hat den Nachteil, dass er direkte Abstrahlung vom Draht zulässt. Die abgestrahlte Energie kann nicht den Verlusten innerhalb des Ferritkerns, welche hauptsächlich durch Ummagnetisierung und durch Wirbelströme entstehen, zugeordnet werden.

[0007] In URABE, Junichiro [et al.]: A method for measuring the characteristics of an EMI suppression ferrite core. In: IEEE transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 48, Nr. 4, November 2006, S. 774–780 wird beschrieben, wie ein Kabelferrit als Dämpfungselement auf einem Kabel zwischen zwei elektrischen Geräten wirkt. Dazu wird ein theoretisches Modell herangezogen, welches die Streuparameter der Anordnung beinhaltet und welches den Einfluss des Ferrites auf die Stromverteilung entlang des Kabels wiedergibt. Die Wirkung des Kabelferrites wird weiterhin an einem generischen Prüfling sowie an zwei realen Geräten (Desktop-PC und Mikrowellenherd) messtechnisch ermittelt. Der Frequenzbereich der Betrachtungen erstreckt sich von 15 MHz bis 100 MHz.

[0008] Aus URABE, Junichiro [et al.]: A study of EMI suppression characteristics of ferrite cores. In: Konferenzband 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006, S. 622–625 ist bekannt, wie die Dämpfungseigenschaften von Kabelferriten mit Hilfe einer offenen Übertragungsleitungsanordnung messtechnisch ermittelt werden können. Die Anordnung entspricht in ihrer Form der in der Norm CISPR 17 empfohlenen. Sie besteht aus 2 Metallwinkeln, befestigt auf einer größeren Metallplatte, zwischen denen sich der Innenleiter der beiden koaxialen Anschlüsse für das Messsystem als horizontaler Stab befindet. Der

Außenleiter der coaxialen Anschlüsse ist mit der Metallplatte elektrisch verbunden. Der Ferrit befindet sich während der Messung auf dem Innenleiter. Der Einfluss der Größe der Metallplatte wird mit Hilfe einer Simulation (FDTD) untersucht. Die Streuparameter der leeren Anordnung sowie der Anordnung mit Ferrit werden analytisch beschrieben. Es wird ein vereinfachtes Modell für den Reflexionsfaktor und die Einfügedämpfung angegeben. Weiterhin werden Messfehler näher untersucht. Der Frequenzbereich der Betrachtungen erstreckt sich von 30 MHz bis 1 GHz.

[0009] Vor diesem Hintergrund besteht die Aufgabe der vorliegenden Erfindung in der Überwindung der aufgezeigten messtechnischen Nachteile. Zudem besteht die Aufgabe darin, interpretierbare elektrische Parameter für Kabelferrite zu gewinnen.

[0010] Diese Aufgabe wird nun mit einem Verfahren nach Anspruch 1 und einer Vorrichtung nach Anspruch 4 gelöst; weitere vorteilhafte Ausführungsformen gehen aus den Unteransprüchen hervor.

[0011] Vorgeschlagen wird ein Verfahren zur Charakterisierung von Kabelferriten, umfassend zumindest die folgenden Schritte:

- Bereitstellung eines geschlossenen coaxialen TEM Wellenleiters als Messadapter (**1a**, **1b**) zur Aufnahme eines zu untersuchenden Kabelferrites (**2**),
- Vermessung der Streuparameter des mit dem Kabelferrit (**2**) bestückten Messadapters (**1a**, **1b**) im zu untersuchenden Frequenzbereich mit Hilfe eines 2-Tor-Netzwerkanalysators,
- analytische Beschreibung des leeren Messadapters mit Hilfe einer Kettenparameterdarstellung,
- Bereitstellung der im zu untersuchenden Frequenzbereich messtechnisch ermittelten komplexen relativen Permeabilität des Materials des Kabelferrites (**2**),
- Verwendung eines elektrischen Ersatzschaltbildes des Kabelferrites (**2**) innerhalb des Messadapters (**1a**, **1b**),
- analytische Berechnung der aus der Kettenparameterdarstellung gewonnenen Streuparameter des mit dem Kabelferrit (**2**) bestückten Messadapters (**1a**, **1b**),
- Variation der primären Ferritparameter, bis eine tolerierbare Übereinstimmung zwischen analytischem Modell und den Messergebnissen unterhalb der ersten Resonanzstelle vorliegt,
- Extraktion der frequenzabhängigen Ferritparameter $\underline{Y}_{\text{Ferrit}}$ und $\underline{Z}_{\text{Ferrit}}$.

[0012] Eine Weiterbildung des Verfahrens sieht zumindest folgende Schritte vor:

- analytische Beschreibung des leeren Messadapters (**1a**, **1b**) mit Hilfe einer Kettenparameterdarstellung, durch
- Bestimmung der charakteristischen Impedanz Z_c in Ohm der einzelnen Abschnitte des Messadapters (**1a**, **1b**), in Abhängigkeit vom Verhältnis des Außenleiterdurchmessers d_a zum Innenleiterdurchmesser d_i , und ausgedrückt durch Gleichung (1):

$$Z_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right) \quad (1)$$

- mit $\epsilon = \epsilon_r \times 8,854 \text{ pF/m}$ und $\mu_0 = 1,257 \text{ }\mu\text{H/m}$, wobei
- die relative Permittivität ϵ_r in den Abschnitten I und V des Messadapters den Wert des Isolationsstoffes zwischen Innen- (**5**) und Außenleiter (**1**) hat und in den übrigen Abschnitten den Wert 1 aufweist,
- Approximierung der konischen Abschnitte des Messadapters (II; IV) durch dünne Scheiben mit konstanten Radien des Innen- (**5**) und Außenleiters (**1**), so dass Gleichung (1) verwendet werden kann, um die charakteristische Impedanz jeder einzelnen Scheibe zu ermitteln,
- Bestimmung der Kettenparametermatrix einer homogenen Übertragungsleitung nach Gleichung (2):

$$\underline{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \cosh(\underline{y} \cdot l) & \underline{Z}_c \cdot \sinh(\underline{y} \cdot l) \\ \frac{1}{\underline{Z}_c} \cdot \sinh(\underline{y} \cdot l) & \cosh(\underline{y} \cdot l) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

- mit $\underline{y} = j\omega/c$ als komplexer Propagationskoeffizient, $\omega = 2\pi \cdot f$ als Kreisfrequenz, der Lichtgeschwindigkeit $c = 299792458 \text{ m/s}$ und l als Länge des jeweiligen Abschnittes,
- Ermittlung der Kettenparametermatrix des gesamten Adapters aus den Kettenparametermatrizen der Einzelsegmente durch Multiplikation, wobei
- die Kettenparametermatrix des linken Teils des Messadapters die Abschnitte I und II umfasst, und die des rechten Teils die Abschnitte IV und V nach Gleichung (3) und (4):

$$\underline{A}_{\text{links}} = \underline{A}_I \cdot \underline{A}_{II} \quad (3)$$

$$\underline{A}_{\text{rechts}} = \underline{A}_{IV} \cdot \underline{A}_V \quad (4)$$

[0013] Zudem ist bei diesem Verfahren vorgesehen, dass die analytische Berechnung der aus der Kettenparameterdarstellung gewonnenen Streuparameter des mit einem Kabelferrit (2) bestückten Messadapters (1) wie folgt vorgenommen wird:

- Bereitstellung eines elektrischen Ersatzschaltbildes eines Kabelferrites, bestehend aus einem resistiven, einem induktiven und einem kapazitiven Element, wobei
- die längenbezogenen Serienelemente abhängig von der Frequenz des anregenden Signals sind,
- der Serienwiderstandsbelag R'_{Ferrit} und der Induktivitätsbelag L'_{Ferrit} mit der komplexen Permeabilität $\underline{\mu} = \mu_r + j \cdot \mu_i$ des Ferritmaterials zusammenhängen,
- die Annahme des Kapazitätsbelags C'_{Ferrit} als frequenzunabhängig, aber vom Wert her variabel gilt und
- ein Querleitwertbelag unberücksichtigt bleibt, da im Ferrit vernachlässigbare dielektrische Verluste auftreten,
- Ermittlung des Induktivitätsbelags eines zylinderförmigen Kabelferrites mit dem Außendurchmesser $d_{a,\text{Ferrit}}$ und dem Innendurchmesser $d_{i,\text{Ferrit}}$ mittels Gleichung (5):

$$L'_{\text{Zylinder}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d_{a,\text{Ferrit}}}{d_{i,\text{Ferrit}}}\right), \quad (5)$$

- Charakterisierung der Serienelemente des Ferritersatzschaltbildes durch Gleichung (6):

$$R'_{\text{Ferrit}}(f) = 2\pi \cdot f \cdot \mu_i(f) \cdot L'_{\text{Zylinder}} \cdot k \quad (6)$$

und Gleichung (7):

$$L'_{\text{Ferrit}}(f) = \mu_r(f) \cdot L'_{\text{Zylinder}} \cdot k, \quad (7)$$

- wobei der Faktor k als Variationsparameter eingefügt wird und
- wobei das Ferritersatzschaltbild dem eines Leitungsvierpols ähnelt,
- Bestimmung eines komplexen Propagationskoeffizienten $\underline{y}_{\text{Ferrit}}$ und einer komplexen Ferritimpedanz $\underline{Z}_{\text{Ferrit}}$ mittels Gleichung (8) und (9):

$$\underline{y}_{\text{Ferrit}}(f) = \alpha_{\text{Ferrit}}(f) + j\beta_{\text{Ferrit}}(f) = \sqrt{(R'_{\text{Ferrit}} + j\omega L'_{\text{Ferrit}}) \cdot j\omega C'_{\text{Ferrit}}} \quad (8)$$

$$\underline{Z}_{\text{Ferrit}}(f) = \sqrt{\frac{R'_{\text{Ferrit}} + j\omega L'_{\text{Ferrit}}}{j\omega C'_{\text{Ferrit}}}}, \quad (9)$$

- wobei α_{Ferrit} der Dämpfungskoeffizient und β_{Ferrit} der Phasenkoeffizient sind,
- Bestimmung des Kapazitätsbelags C'_{IIIb} zwischen dem Innen- (5) und dem Außenleiter (1) im zylindrischen Mittelteil des Messadapters über die Länge $l_{\text{Ferrit}} = l_{IIIb}$ des untersuchten Kabelferrites (Abschnitt IIIb) mittels Gleichung (10):

$$C'_{IIIb} = 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left[\ln\left(\frac{d_{a,IIIb}}{d_{i,IIIb}}\right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

- Addition des Kapazitätsbelags C'_{IIIb} zum Ferritkapazitätsbelag, was C'_{IIIb} ergibt,
- Bestimmung der Kettenparametermatrix des Mittelteils mit dem modifizierten Propagationskoeffizienten \underline{y}_{IIIb} nach Gleichung (8) und mit der modifizierten Impedanz \underline{Z}_{IIIb} nach Gleichung (9) mittels Gleichung (11):

$$\underline{A}_{IIIb} = \begin{pmatrix} \cosh(\underline{y}_{IIIb} \cdot l_{\text{Ferrit}}) & \underline{Z}_{IIIb} \cdot \sinh(\underline{y}_{IIIb} \cdot l_{\text{Ferrit}}) \\ \frac{1}{\underline{Z}_{IIIb}} \cdot \sinh(\underline{y}_{IIIb} \cdot l_{\text{Ferrit}}) & \cosh(\underline{y}_{IIIb} \cdot l_{\text{Ferrit}}) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

– Verwendung des Ergebnisses von Gleichung (11) und Multiplikation mit den Parametermatrizen der am linken und rechten Ende sich anschließenden Abschnitte des beladenen Messadapters (1) wie folgt:

$\underline{A}_{ges} = \underline{A}_{links} \cdot \underline{A}_{IIa} \cdot \underline{A}_{IIb} \cdot \underline{A}_{IIc} \cdot \underline{A}_{rechts}$, (12)
 – Berechnung der Streuparametermatrix aus der Kettenparametermatrix für jede betrachtete Frequenz nach Gleichung (13):

$$\underline{S}_{ges} = \begin{pmatrix} \frac{A_{ges,11} + \frac{A_{ges,12}}{Z_0} - A_{ges,21} \cdot Z_0 - A_{ges,22}}{2} & \frac{2(A_{ges,11} \cdot A_{ges,22} - A_{ges,12} \cdot A_{ges,21})}{A_{ges,11} + \frac{A_{ges,12}}{Z_0} + A_{ges,21} \cdot Z_0 + A_{ges,22}} \\ \frac{A_{ges,11} + \frac{A_{ges,12}}{Z_0} + A_{ges,21} \cdot Z_0 + A_{ges,22}}{2} & \frac{-A_{ges,11} + \frac{A_{ges,12}}{Z_0} - A_{ges,21} \cdot Z_0 + A_{ges,22}}{A_{ges,11} + \frac{A_{ges,12}}{Z_0} + A_{ges,21} \cdot Z_0 + A_{ges,22}} \end{pmatrix} \quad (13)$$

[0014] Vorgeschlagen wir weiterhin eine Vorrichtung, umfassend zumindest folgende Bestandteile:

- a) ein vollständig geschlossener, symmetrischer, metallischer Außenleiter (1a, 1b) mit kreisförmigem Querschnitt,
- b) ein metallischer Innenleiter (5a, 5b) mit kreisförmigem Querschnitt, der konzentrisch durch den Kabelferrit (2) führt,
- c) beidseitig axial angebrachte koaxiale Flanschadapter (4a, 4b) mit einer charakteristischen Impedanz des Messsystems von typisch 50 Ω.

[0015] Eine Weiterbildung der Vorrichtung sieht vor, dass der Außenleiter (1a, 1b) aus zwei formschlüssigen Hälften besteht, die mittels eines umlaufenden Gewindes (6) elektrisch verbunden werden können.

[0016] In einer weiteren Ausführungsform der Vorrichtung ist vorgesehen, dass Außenleiter (1a, 1b) und Innenleiter (5a, 5b) über die Länge l_{II} bzw. l_{IV} zu den Anschlüssen (4a, 4b) hin konisch zusammenlaufen.

[0017] Bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung ebenfalls vorgesehen ist, dass der Außenleiter (1a, 1b) auf der inneren Seite der Flanschadapter (4a, 4b) den Durchmesser d_{a1} und der Innenleiter (5a, 5b) den Durchmesser d_{i1} aufweist und dass das Verhältnis der beiden Größen zusammen mit der Permittivität des Isolationsmaterials $\epsilon_{r,I}$ die Impedanz des Messsystems nach Gleichung (1) ergibt.

[0018] Eine weitere Ausführungsform der Vorrichtung sieht vor, dass der Außenleiter (1a, 1b) im Mittelstück über die Länge l_{III} den Durchmesser d_{a2} und der Innenleiter (5a, 5b) den Durchmesser d_{i2} aufweist und dass das Verhältnis der beiden Größen zusammen mit der Permittivität ϵ_0 den Kapazitätsbelag C_{III} nach Gleichung (10) ergibt. Der Außenleiterdurchmesser sollte dem zu vermessenden Kabelferrit (2) mit dem größten Außenmaß und der Innenleiterdurchmesser dem mit dem kleinsten Innenmaß angepasst sein.

[0019] Nach einer weiteren Ausführungsform ist vorgesehen, dass die Länge l_{III} größer sein soll als der längste zu vermessene Kabelferrit (2).

[0020] Eine weitere Ausführungsform der Vorrichtung sieht vor, dass, dass innerhalb des Abschnittes III des Messadapters eine Scheibe (3) aus nicht-leitfähigem Material und mit $\epsilon_{r,IIIc} \approx 1$ als einseitige Auflagefläche für den zu vermessenden Kabelferrit (2) eingefügt wird.

[0021] Das Verfahren und die Vorrichtung können dazu genutzt werden, Kabelferrite, die für die Unterdrückung von elektromagnetischen Störsignalen auf Leitungen/Kabeln eingesetzt werden, messtechnisch so zu charakterisieren, dass ihre Wirkung aus der Sicht des Anwenders beurteilt werden kann. Hierdurch können die elektrischen Parameter von Kabelferriten, die aus verschiedenen Ferritmaterialien bestehen und unterschiedliche Geometrie haben können, untereinander verglichen werden, um das für die Anwendung optimale Bauteil zu finden.

[0022] Bei der erfindungsgemäßen Messmethode wird ein geschlossener coaxialer TEM Wellenleiter als Messadapter verwendet, in dem das zu untersuchende Objekt auf dem Innenleiter platziert wird. Durch einen analytischen Ansatz für die Auswertung des Messergebnisses kann der Einfluss des Messadapters herausgerechnet werden.

[0023] Dieser Ansatz ist bis zu einigen Gigahertz gültig und erfasst auch Resonanzen, die im Messadapter auftreten. Für den Ferrit wird ein elektrisches Ersatzschaltbild verwendet, das die Hauptwirkungsweise der Ferrite beschreibt. Dabei werden nicht, wie bisher, konstante Parameter vorausgesetzt, sondern es werden die frequenzabhängigen Materialparameter mit einbezogen, was die Genauigkeit der Ergebnisse erhöht. Mit Hilfe der ermittelten Ferritparameter lassen sich Modelle erzeugen, die in numerischen Schaltungsberechnungstools Verwendung finden können.

[0024] Im Gegensatz hierzu orientieren sich derzeitige Messmethoden an der für die elektrische Charakterisierung von Hochfrequenzfiltern gültigen internationalen Norm CISPR 17 [2]. Der Nachteil der dort beschriebenen Methode ist, dass der Ferrit nicht für sich allein vermessen wird, so dass das Messergebnis nur für diesen Messaufbau gültig ist. Es kann nicht direkt auf in der Realität auftretende Anwendungsfälle übertragen werden. Außerdem kommt es durch den offenen Messaufbau zu elektromagnetischer Abstrahlung, deren Wirkung nicht dem Kabelferrit zugeordnet werden kann.

[0025] Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Beispielen und Figuren erläutert, wobei die Erfindung nicht hierauf beschränkt ist:

Erfindungsgemäß wird ein Messaufbau zur Verfügung gestellt, bestehend aus einem geschlossenen coaxialen TEM Wellenleiter, bei dem eine Wellenleitergeometrie mit höherer Präzision verwendet wird, um eine breitere Palette von Ferritgrößen testen zu können. Der Außenleiter hat gleichmäßige Übergänge an den Enden und einen zylindrischen Mittelteil, in dem der Ferrit platziert wird. Außerdem wurde die komplexe Permeabilität des Ferritmaterials einbezogen, aus der sich frequenzabhängige Parameter ergeben.

[0026] Es zeigen:

[0027] Fig. 1: eine schematische Darstellung eines Messadapters mit einem Kabelferrit,

[0028] Fig. 2: ein Vierpolersatzschaltbild des Messadaptermittelteils (III) mit einem Kabelferrit und dem Kapazitätsbelag C_{IIIb} ,

[0029] Fig. 3: eine gemessene komplexe Permeabilität eines Ferritmaterials,

[0030] Fig. 4: berechnete Serienparameter eines Ferritmaterials,

[0031] Fig. 5: den Transmissionskoeffizient S_{21} für den mit einem Kabelferrit beladenen Messadapter mit der ersten Resonanz bei 600 MHz,

[0032] Fig. 6: den Reflexionskoeffizient S_{11} für den mit einem Kabelferrit beladenen Messadapter mit der ersten Resonanz bei 600 MHz,

[0033] Fig. 7: den Betrag des Propagationskoeffizienten γ_{Ferrit} und

[0034] Fig. 8: den Betrag der Ferritimpedanz Z_{Ferrit} .

Beispielgeometrie:

[0035] Fig. 1 zeigt eine Gesamtansicht des für Versuchsmessungen verwendeten Messadapters. Der Messadapter hat eine bevorzugte mechanische Gesamtlänge zwischen den coaxialen N-Anschlüssen von 326,8 mm. Die Distanz zwischen den Kalibrierebenen beträgt vorzugsweise 318,8 mm. Die konischen Abschnitte (II, IV) sollen maximal 100 mm lang sein und das Mittelstück (III) soll so lang sein, dass sich der längste zu vermessende Kabelferrit innerhalb des Mittelstückes befindet und nicht in die konischen Abschnitte hineinragt.

[0036] Je kürzer die konischen Abschnitte und damit die Gesamtlänge des Messadapters sind, umso höher liegt die erste Hohlraum-Resonanzfrequenz der Struktur, was den nutzbaren Frequenzbereich vergrößert.

[0037] Für die analytische Beschreibung des leeren Messadapters ist eine Unterteilung der konischen Teile in 500 Scheiben mit konstantem Innen- und Außenleiterdurchmesser ausreichend für eine hohe Genauigkeit der Kettenparameter bzw. Streuparameter.

[0038] Tabelle 1 enthält die Hauptmaße des Adapters. Die internen Abmaße wurden so gewählt, dass möglichst viele verschiedene Ferritgeometrien untersucht werden können.

Maß	Wert
l_I	36,4 mm
l_{II}	97 mm
l_{III}	60 mm
l_{IV}	97 mm
l_V	36,4 mm
d_{i1}	3 mm
d_{i2}	4,2 mm
d_{a1}	9,8 mm
d_{a2}	63,8 mm
Öffnungswinkel Außenleiter	34,2°
Öffnungswinkel Innenleiter	0,712°
l_{IIIc} (Styrodurscheibe)	11 mm

Tabelle 1: Geometrie des bevorzugten Messadapters

Literatur:

[1] U. Knauff, Interner Report, Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg, 2007.

[2] CISPR 17, „Verfahren zur Messung der Entstöreigenschaften von passiven EMV-Filtern,“ Juni 2011.

[3] F. Ossevorth, U. Knauff, F. Schröder, H. G. Krauthäuser, „Analytische Beschreibung von Dämpfungsferriten auf Leitungen,“ Konferenzband der EMV 2010 Konferenz, Düsseldorf, VDE Verlag Berlin, S. 201–208, März 2010.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Charakterisierung von Kabelferriten, umfassend zumindest die folgenden Schritte:

- Bereitstellung eines geschlossenen koaxialen TEM Wellenleiters als Messadapter (**1a**, **1b**) zur Aufnahme eines zu untersuchenden Kabelferrites (**2**),
- Vermessung der Streuparameter des mit dem Kabelferrit (**2**) bestückten Messadapters (**1a**, **1b**) im zu untersuchenden Frequenzbereich mit Hilfe eines 2-Tor-Netzwerkanalysators,
- analytische Beschreibung des leeren Messadapters mit Hilfe einer Kettenparameterdarstellung,
- Bereitstellung der im zu untersuchenden Frequenzbereich messtechnisch ermittelten komplexen relativen Permeabilität des Materials des Kabelferrites (**2**),
- Verwendung eines elektrischen Ersatzschaltbildes des Kabelferrites (**2**) innerhalb des Messadapters (**1a**, **1b**),
- analytische Berechnung der aus der Kettenparameterdarstellung gewonnenen Streuparameter des mit dem Kabelferrit (**2**) bestückten Messadapters (**1a**, **1b**),
- Variation der primären Ferritparameter, bis eine tolerierbare Übereinstimmung zwischen analytischem Modell und den Messergebnissen unterhalb der ersten Resonanzstelle vorliegt,
- Extraktion der frequenzabhängigen Ferritparameter $\underline{Y}_{\text{Ferrit}}$ und $\underline{Z}_{\text{Ferrit}}$.

2. Verfahren nach Anspruch 1, aufweisend zumindest folgende Schritte:

- analytische Beschreibung des leeren Messadapters (**1a**, **1b**) mit Hilfe einer Kettenparameterdarstellung, durch
- Bestimmung der charakteristischen Impedanz Z_c in Ohm der einzelnen Abschnitte des Messadapters (**1a**, **1b**), in Abhängigkeit vom Verhältnis des Außenleiterdurchmessers d_a zum Innenleiterdurchmesser d_i , und ausgedrückt durch Gleichung (1):

$$Z_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right) \quad (1)$$

- mit $\epsilon = \epsilon_r \times 8,854 \text{ pF/m}$ und $\mu_0 = 1,257 \text{ }\mu\text{H/m}$, wobei
- die relative Permittivität ϵ_r in den Abschnitten I und V des Messadapters den Wert des Isolationsstoffes zwischen Innen- (5) und Außenleiter (1) hat und in den übrigen Abschnitten den Wert 1 aufweist,
- Approximierung der konischen Abschnitte des Messadapters (II; IV) durch dünne Scheiben mit konstanten Radien des Innen- (5) und Außenleiters (1), so dass Gleichung (1) verwendet werden kann, um die charakteristische Impedanz jeder einzelnen Scheibe zu ermitteln,
- Bestimmung der Kettenparametermatrix einer homogenen Übertragungsleitung nach Gleichung (2):

$$\underline{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \cosh(\underline{\gamma} \cdot l) & \underline{Z}_c \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot l) \\ \frac{1}{\underline{Z}_c} \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot l) & \cosh(\underline{\gamma} \cdot l) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

- mit $\underline{\gamma} = j\omega/c$ als komplexer Propagationskoeffizient, $\omega = 2\pi \cdot f$ als Kreisfrequenz, der Lichtgeschwindigkeit $c = 299792458 \text{ m/s}$ und l als Länge des jeweiligen Abschnittes,
- Ermittlung der Kettenparametermatrix des gesamten Adapters aus den Kettenparametermatrizen der Einzelsegmente durch Multiplikation, wobei
- die Kettenparametermatrix des linken Teils des Messadapters die Abschnitte I und II umfasst, und die des rechten Teils die Abschnitte IV und V nach Gleichung (3) und (4):

$$\underline{\mathbf{A}}_{\text{links}} = \underline{\mathbf{A}}_I \cdot \underline{\mathbf{A}}_{II}, \quad (3)$$

$$\underline{\mathbf{A}}_{\text{rechts}} = \underline{\mathbf{A}}_{IV} \cdot \underline{\mathbf{A}}_V. \quad (4)$$

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die analytische Berechnung der aus der Kettenparameterdarstellung gewonnenen Streuparameter des mit einem Kabelferrit (2) bestückten Messadapters (1) wie folgt vorgenommen wird:

- Bereitstellung eines elektrischen Ersatzschaltbildes eines Kabelferrites, bestehend aus einem resistiven, einem induktiven und einem kapazitiven Element, wobei
- die längenbezogenen Serienelemente abhängig von der Frequenz des anregenden Signals sind,
- der Serienwiderstandsbelag R_{Ferrit} und der Induktivitätsbelag L'_{Ferrit} mit der komplexen Permeabilität $\underline{\mu} = \mu' + j\mu''$ des Ferritmaterials zusammenhängen,
- die Annahme des Kapazitätsbelag C_{Ferrit} als frequenzunabhängig, aber vom Wert her variabel gilt und
- ein Querleitwertbelag unberücksichtigt bleibt, da im Ferrit vernachlässigbare dielektrische Verluste auftreten,
- Ermittlung des Induktivitätsbelags eines zylinderförmigen Kabelferrites mit dem Außendurchmesser $d_{a,\text{Ferrit}}$ und dem Innendurchmesser $d_{i,\text{Ferrit}}$ mittels Gleichung (5):

$$L'_{\text{Zylinder}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d_{a,\text{Ferrit}}}{d_{i,\text{Ferrit}}}\right), \quad (5)$$

- Charakterisierung der Serienelemente des Ferritersatzschaltbildes durch Gleichung (6):

$$R_{\text{Ferrit}}(f) = 2\pi \cdot f \cdot \mu''(f) \cdot L'_{\text{Zylinder}} \cdot k \quad (6)$$

und Gleichung (7):

$$L_{\text{Ferrit}}(f) = \mu'(f) \cdot L'_{\text{Zylinder}} \cdot k, \quad (7)$$

- wobei der Faktor k als Variationsparameter eingefügt wird und
- wobei das Ferritersatzschaltbild dem eines Leitungsvierpols ähnelt,
- Bestimmung eines komplexen Propagationskoeffizienten $\underline{\gamma}_{\text{Ferrit}}$ und einer komplexen Ferritimpedanz $\underline{Z}_{\text{Ferrit}}$ mittels Gleichung (8) und (9):

$$\underline{y}_{\text{Ferrit}}(f) = \alpha_{\text{Ferrit}}(f) + j\beta_{\text{Ferrit}}(f) = \sqrt{(R'_{\text{Ferrit}} + j\omega L'_{\text{Ferrit}}) \cdot j\omega C'_{\text{Ferrit}}} \quad (8)$$

$$\underline{Z}_{\text{Ferrit}}(f) = \sqrt{\frac{R'_{\text{Ferrit}} + j\omega L'_{\text{Ferrit}}}{j\omega C'_{\text{Ferrit}}}}, \quad (9)$$

- wobei α_{Ferrit} der Dämpfungskoeffizient und β_{Ferrit} der Phasenkoeffizient sind,
- Bestimmung des Kapazitätsbelags C_{IIb} zwischen dem Innen- (5) und dem Außenleiter (1) im zylindrischen Mittelteil des Messadapters über die Länge $l_{\text{Ferrit}} = l_{\text{IIb}^*}$ des untersuchten Kabelferrites (Abschnitt IIIb) mittels Gleichung (10):

$$C'_{\text{IIb}} = 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left[\ln \left(\frac{d_{\text{a,IIb}}}{d_{\text{i,IIb}}} \right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

- Addition des Kapazitätsbelags C_{IIb} zum Ferritkapazitätsbelag, was C_{IIb^*} ergibt,
- Bestimmung der Kettenparametermatrix des Mittelteils mit dem modifizierten Propagationskoeffizienten $\underline{y}_{\text{IIb}^*}$ nach Gleichung (8) und mit der modifizierten Impedanz $\underline{Z}_{\text{IIb}^*}$ nach Gleichung (9) mittels Gleichung (11):

$$\underline{A}_{\text{IIb}^*} = \begin{pmatrix} \cosh(\underline{y}_{\text{IIb}^*} \cdot l_{\text{Ferrit}}) & \underline{Z}_{\text{IIb}^*} \cdot \sinh(\underline{y}_{\text{IIb}^*} \cdot l_{\text{Ferrit}}) \\ \frac{1}{\underline{Z}_{\text{IIb}^*}} \cdot \sinh(\underline{y}_{\text{IIb}^*} \cdot l_{\text{Ferrit}}) & \cosh(\underline{y}_{\text{IIb}^*} \cdot l_{\text{Ferrit}}) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

- Verwendung des Ergebnisses von Gleichung (11) und Multiplikation mit den Parametermatrizen der am linken und rechten Ende sich anschließenden Abschnitte des beladenen Messadapters (1) wie folgt:

$$\underline{A}_{\text{ges}} = \underline{A}_{\text{links}} \cdot \underline{A}_{\text{IIa}} \cdot \underline{A}_{\text{IIb}} \cdot \underline{A}_{\text{IIc}} \cdot \underline{A}_{\text{rechts}}, \quad (12)$$

- Berechnung der Streuparametermatrix aus der Kettenparametermatrix für jede betrachtete Frequenz nach Gleichung (13):

$$\underline{S}_{\text{ges}} = \begin{pmatrix} \frac{A_{\text{ges},11} + \frac{A_{\text{ges},12}}{Z_0} - A_{\text{ges},21} \cdot Z_0 - A_{\text{ges},22}}{A_{\text{ges},11} + \frac{A_{\text{ges},12}}{Z_0} + A_{\text{ges},21} \cdot Z_0 + A_{\text{ges},22}} & \frac{2(A_{\text{ges},11} \cdot A_{\text{ges},22} - A_{\text{ges},12} \cdot A_{\text{ges},21})}{A_{\text{ges},11} + \frac{A_{\text{ges},12}}{Z_0} + A_{\text{ges},21} \cdot Z_0 + A_{\text{ges},22}} \\ \frac{2}{-A_{\text{ges},11} + \frac{A_{\text{ges},12}}{Z_0} - A_{\text{ges},21} \cdot Z_0 + A_{\text{ges},22}} & \frac{-A_{\text{ges},11} + \frac{A_{\text{ges},12}}{Z_0} - A_{\text{ges},21} \cdot Z_0 + A_{\text{ges},22}}{A_{\text{ges},11} + \frac{A_{\text{ges},12}}{Z_0} + A_{\text{ges},21} \cdot Z_0 + A_{\text{ges},22}} \end{pmatrix} \cdot (13)$$

- Vorrichtung zur Charakterisierung von Kabelferriten, umfassend zumindest folgende Bestandteile:
 - a) ein vollständig geschlossener, symmetrischer, metallischer Außenleiter (1a, 1b) mit kreisförmigem Querschnitt,
 - b) ein metallischer Innenleiter (5a, 5b) mit kreisförmigem Querschnitt, der konzentrisch durch den Kabelferrit (2) führt,
 - c) beidseitig axial angebrachte koaxiale Flanschadapter (4a, 4b) mit einer charakteristischen Impedanz des Messsystems von typisch 50 Ω.

- Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Außenleiter (1a, 1b) aus zwei form-schlüssigen Hälften besteht, die mittels eines umlaufenden Gewindes (6) elektrisch verbunden werden können.

6. Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Außenleiter (**1a, 1b**) und der Innenleiter (**5a, 5b**) über die Länge l_{II} bzw. l_{IV} zu den Anschlüssen (**4a, 4b**) hin konisch zusammenlaufen.

7. Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Außenleiter (**1a, 1b**) auf der inneren Seite der Flanschadapter (**4a, 4b**) den Durchmesser d_{a1} und der Innenleiter (**5a, 5b**) den Durchmesser d_{i1} aufweist und dass das Verhältnis der beiden Größen zusammen mit der Permittivität des Isolationsmaterials $\epsilon_{r,I}$ die Impedanz des Messsystems nach Gleichung (1) ergibt.

8. Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Außenleiter (**1a, 1b**) im Mittelstück über die Länge l_{III} den Durchmesser d_{a2} und der Innenleiter (**5a, 5b**) den Durchmesser d_{i2} aufweist und dass das Verhältnis der beiden Größen zusammen mit der Permittivität ϵ_0 den Kapazitätsbelag C'_{III} nach Gleichung (10) ergibt. Der Außenleiterdurchmesser sollte dem zu vermessenden Kabelferrit (**2**) mit dem größten Außenmaß und der Innenleiterdurchmesser dem mit dem kleinsten Innenmaß angepasst sein.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Länge l_{III} größer sein soll als der längste zu vermessene Kabelferrit (**2**).

10. Vorrichtung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass innerhalb des Abschnittes III des Messadapters eine Scheibe (**3**) aus nicht-leitfähigem Material und mit $\epsilon_{r,IIIc} \approx 1$ als einseitige Auflagefläche für den zu vermessenden Kabelferrit (**2**) eingefügt wird.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

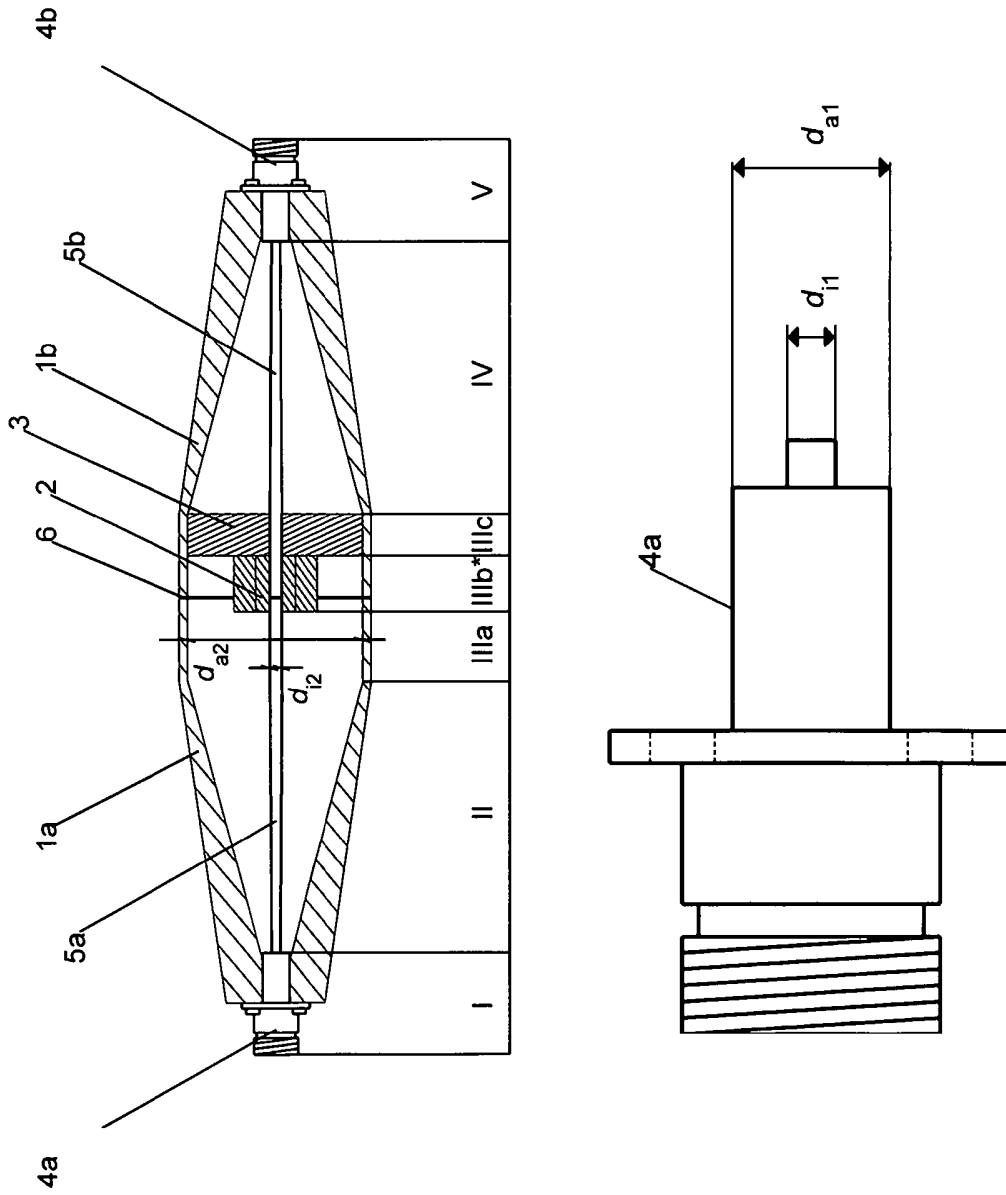


Fig. 1

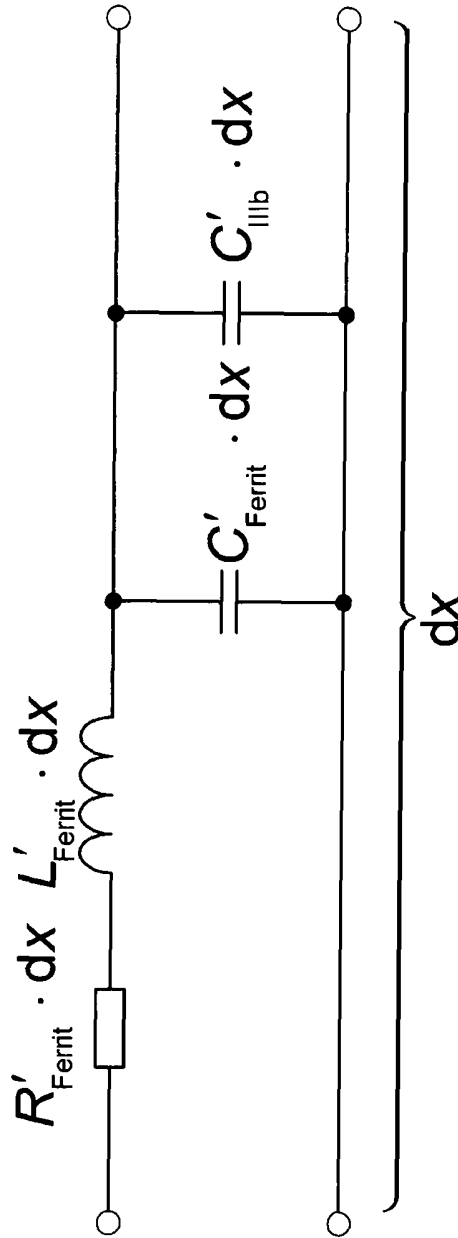


Fig. 2

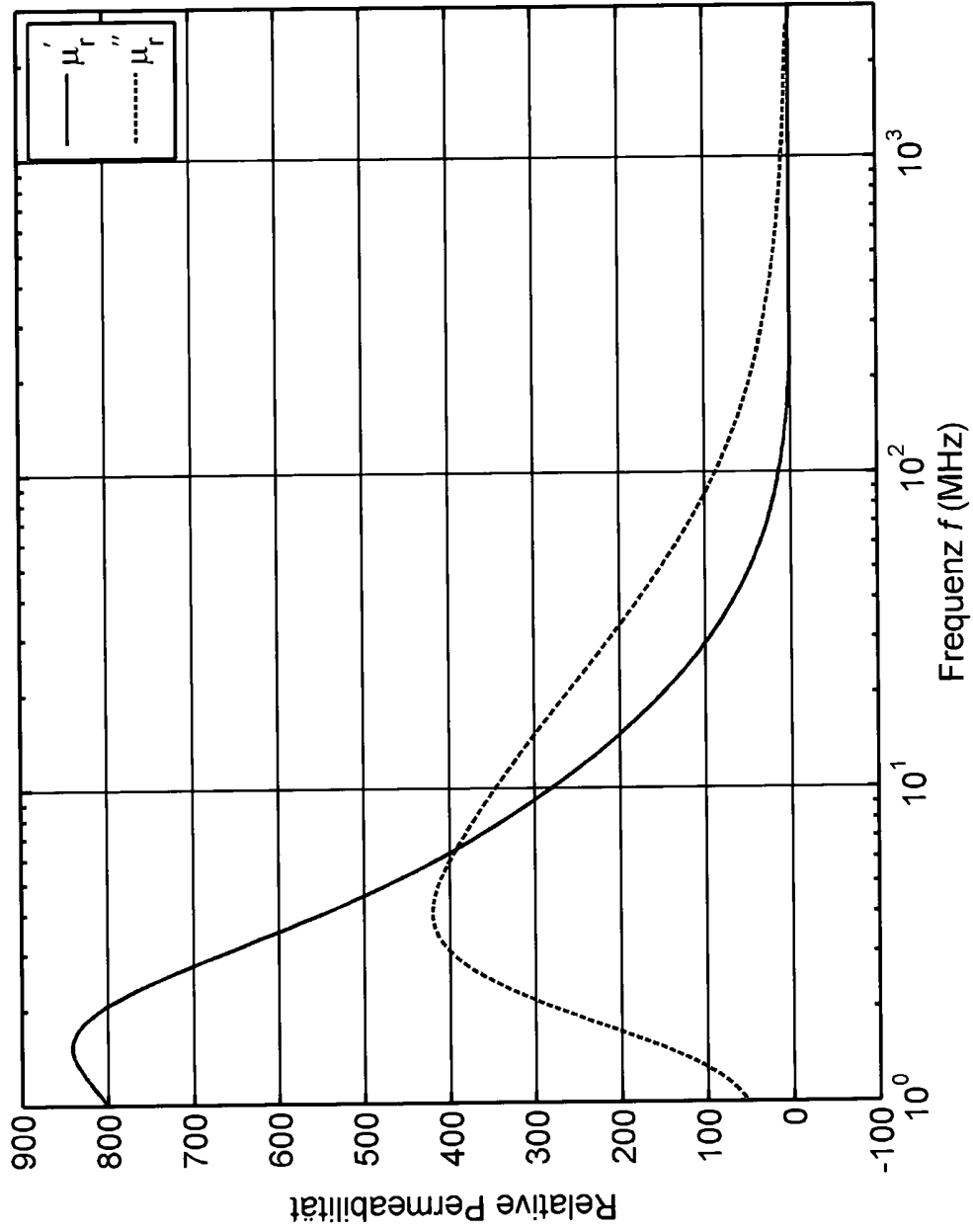


Fig. 3

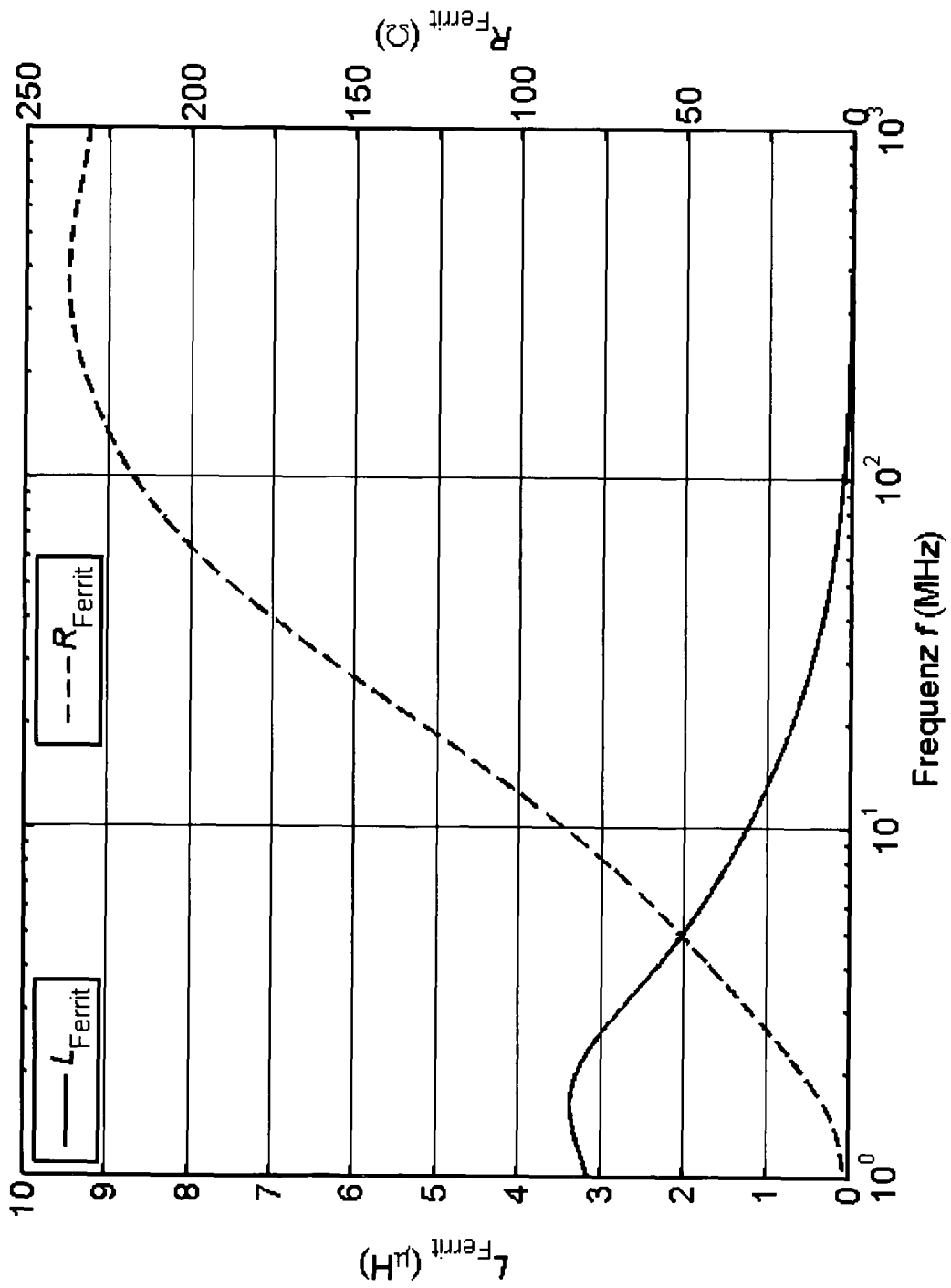


Fig. 4

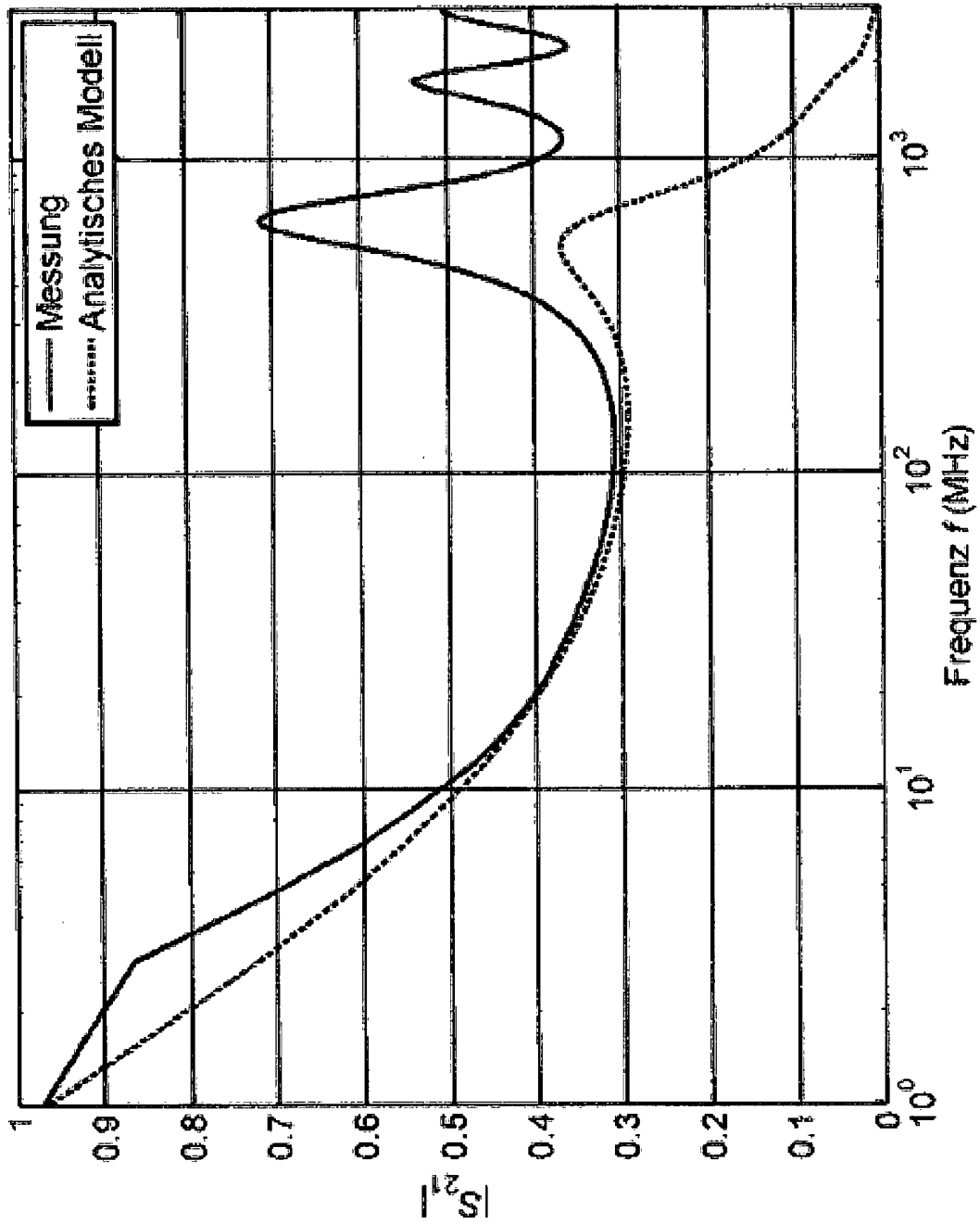


Fig. 5

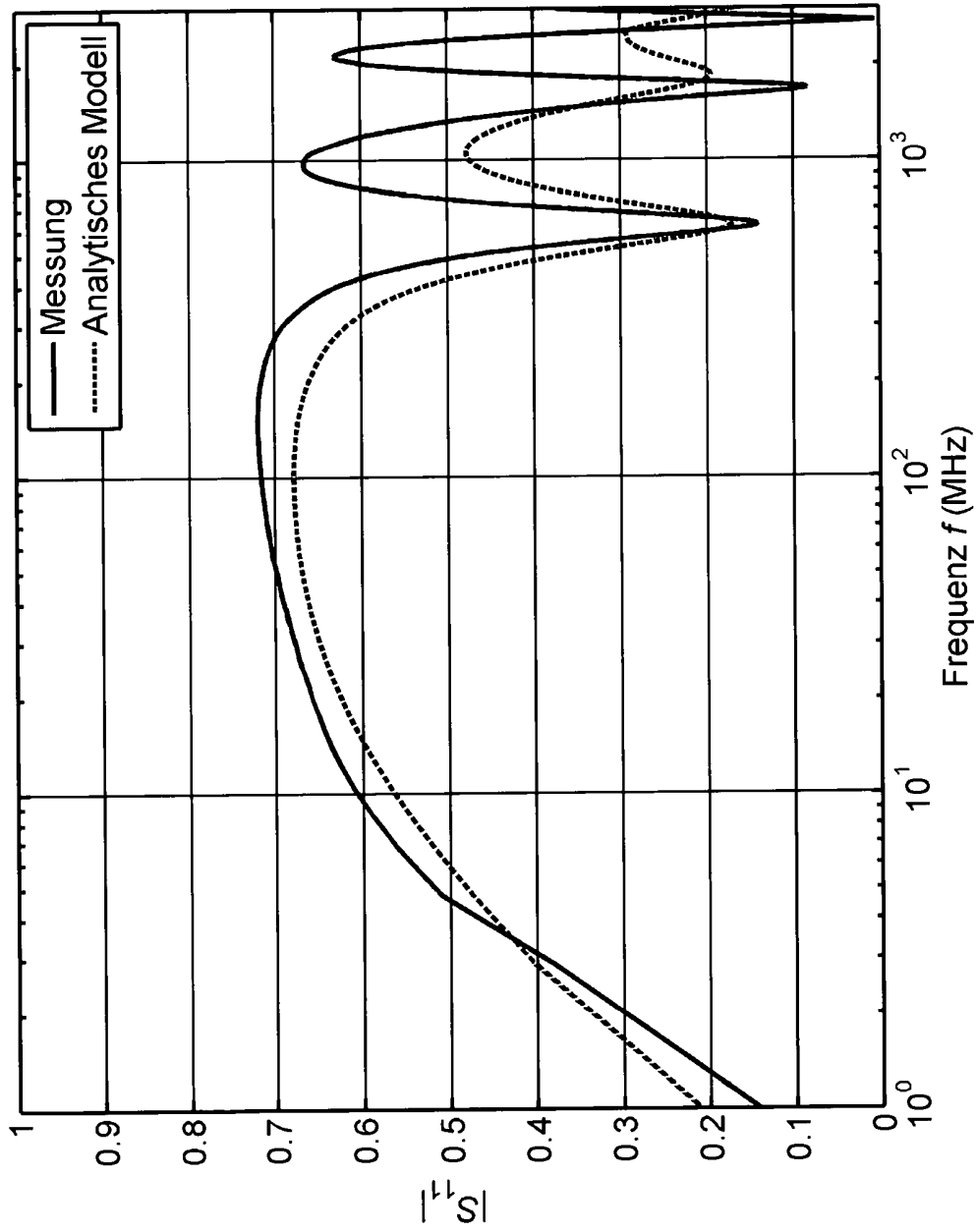


Fig. 6

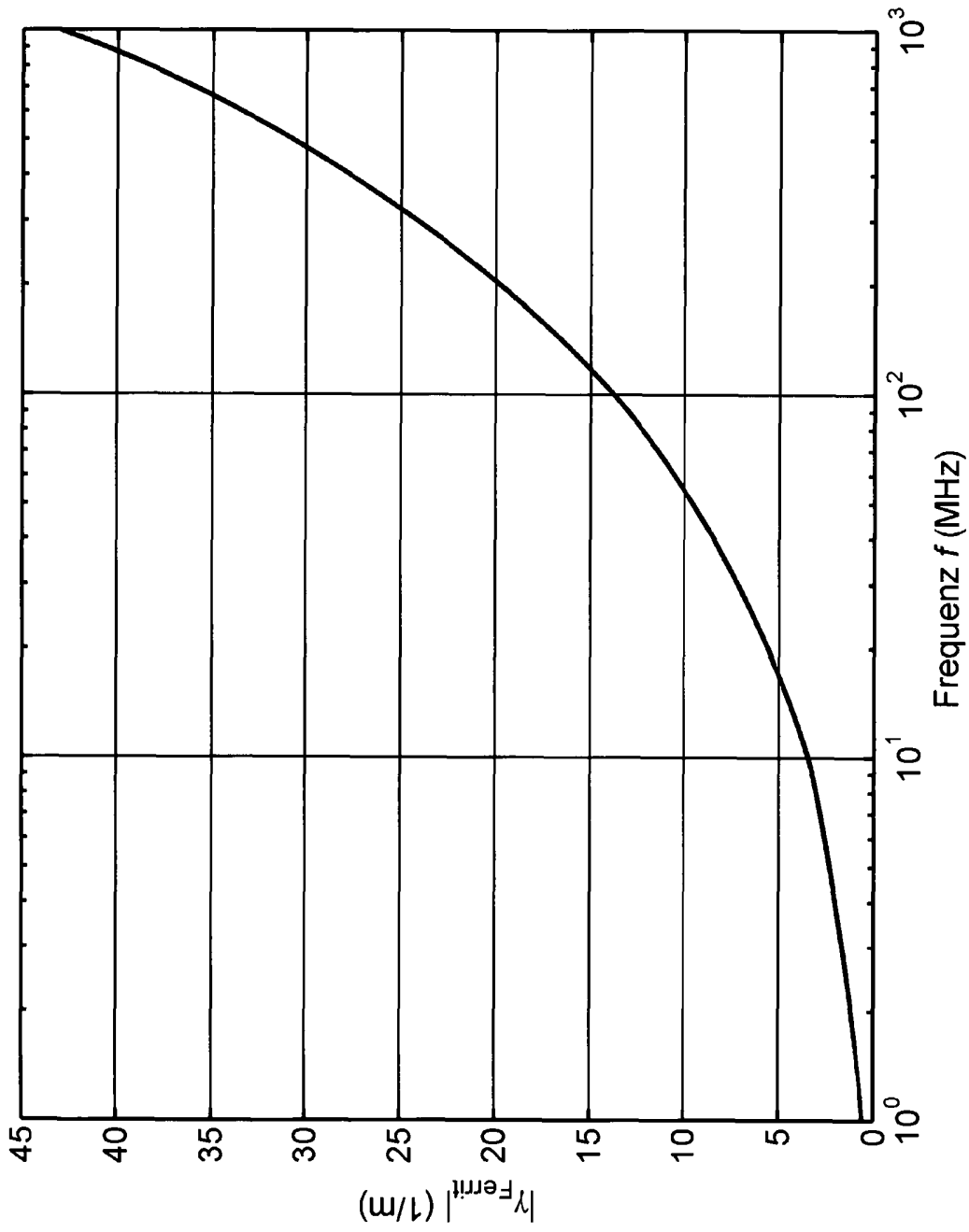


Fig. 7

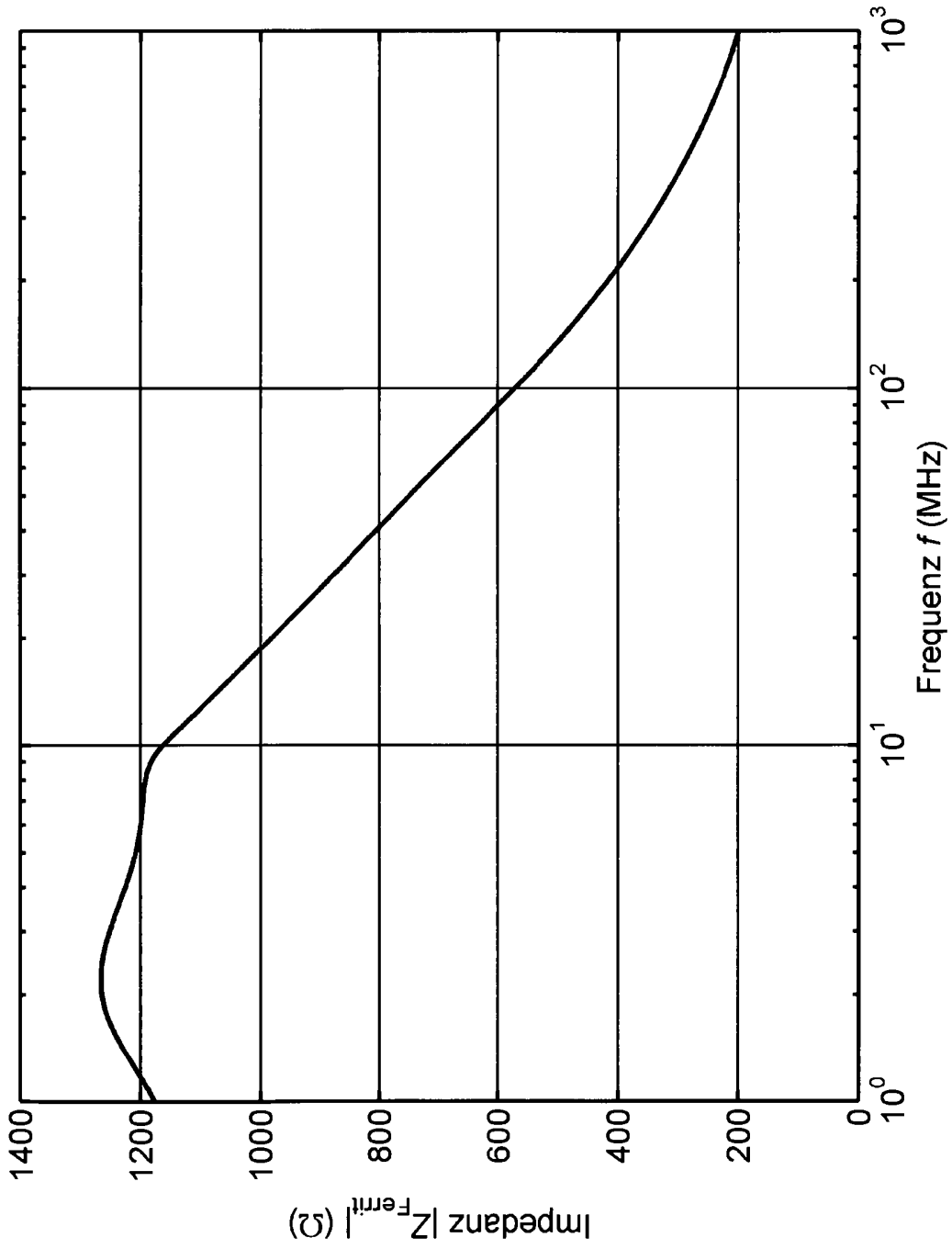


Fig. 8