



CH 683949 A5



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

⑪ CH 683949 A5

⑤① Int. Cl.⁵: G 01 P 21/00
G 01 P 15/00
G 01 N 3/30

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ **PATENTCHRIFT** A5

⑳ Gesuchsnummer: 999/90

㉔ Anmeldungsdatum: 26.03.1990

③① Priorität(en): 04.08.1989 JP 1-203501

㉔ Patent erteilt: 15.06.1994

④⑤ Patentschrift
veröffentlicht: 15.06.1994

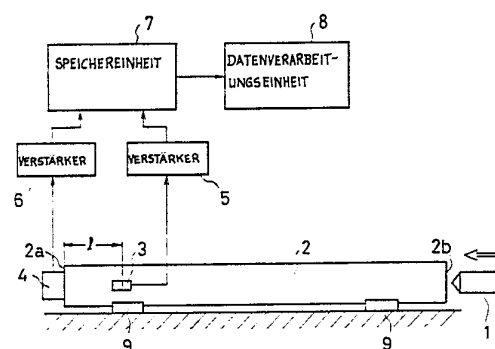
⑦③ Inhaber:
Agency of Industrial Science and Technology of
Ministry of International Trade and Industry,
Chiyoda-ku/Tokyo (JP)

⑦② Erfinder:
Umeda, Akira, Tsukuba-shi/Ibaraki-ken (JP)
Ueda, Kazunaga, Tsukuba-shi/Ibaraki-ken (JP)

⑦④ Vertreter:
E. Blum & Co., Zürich

⑤④ **Verfahren und Apparat zur Messung der dynamischen Charakteristiken eines Stoss-Accelerometers.**

⑤⑦ Das Verfahren zum Messen der dynamischen Charakteristiken eines Stoss-Accelerometers (4) umfasst folgende Schritte: das zu prüfende Accelerometer (4) und einen Dehnungsmesser (3) an ein Ende (2a) eines Axial verschiebbaren Stabes (2) anbringen, dem anderen Ende (2b) des Stabes einen Stoss erteilen, die Beschleunigung, die auftritt, wenn die elastische Welle von der Endfläche des Stabes zurückgeworfen wird, auf den Accelerometer (4) und den Dehnungsmesser (3) wirken lassen, die Ausgangssignale des Accelerometers und des Dehnungsmessers einer Datenverarbeitung und einer Fehlerkompensation unterziehen, um die Verstärkungs- und Phasen-Charakteristiken des Accelerometers zu erhalten.



CH 683949 A5

Beschreibung

Technisches Gebiet

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und einen Apparat zur Messung der dynamischen Charakteristiken, d.h. der Verstärkungscharakteristiken und der Phasen-Charakteristiken, eines Stoss-Accelerometers der Sorte, die für die Messung von Stössen bei Fallversuchen von Behältern zum Transport radioaktiver Materialien, bei der Prüfung von Strukturen bei Stossbeanspruchung, bei der Untersuchung von Fahrzeugzusammenstössen und dergleichen verwendet wird.

Stand der Technik

Stoss-Accelerometer werden bei industriellen Messungen in solch verschiedenen Gebieten wie der Prüfung von Stossbeanspruchungen an Strukturen, Fallversuchen, Spannungsanalysen und Tests zum Analysieren von Vibrationen verwendet.

Zum Kalibrieren eines Stoss-Accelerometers ist die in ISO 5347 beschriebene Methode bekannt, welche eine Kombination eines Vibrators und eines Laser-Interferometers verwendet. Es ist jedoch schwierig sehr präzise Kalibrierungen mit dieser bekannten Methode durchzuführen, weil die Vibrationsamplitude mit steigender Frequenz des Vibrationstisches kleiner wird, und die Wellenform von einer Sinuswelle abweicht. Obwohl die Verwendung eines in Resonanz stehenden Vibrationstisches eine hochfrequente Anregung möglich machte, wird die erreichbare Anregungsfrequenz durch den jeweils verwendeten Vibrationstisch bestimmt, so dass, wenn man die Charakteristiken eines Accelerometers über ein grosses Frequenzgebiet zu messen wünscht, es nötig wird eine grosse Anzahl von Vibrationstischen mit verschiedenen Resonanzfrequenzen zu benützen. Dies führt zu unzuverlässigen Kalibrierungen, und ist ausserdem unwirtschaftlich. Des weiteren ist die bekannte Kalibrierungsmethode zwar nur für Vibrationsbeschleunigungen von höchstens 100 m/s² vorgesehen, wird aber dennoch für Kalibrierungen bei höheren Vibrationsbeschleunigungen verwendet, weil keine andere Methode zur Verfügung steht. Die Zuverlässigkeit der so bestimmten Werte ist daher äusserst zweifelhaft.

Da ein Accelerometer als ein aus einer Feder und einer Masse bestehendes, schwingendes System dargestellt werden kann, hat es eine eigene Resonanzfrequenz. Deshalb ist die Verstärkung (Empfindlichkeit) eines Accelerometers eine Funktion der Frequenz der angelegten Beschleunigung. Im allgemeinen ist die Verstärkung im niederfrequenten Gebiet konstant, steigt jedoch wenn die Frequenz der angelegten Beschleunigung der Resonanzfrequenz näher kommt. Da der Accelerometer nur in einem Bereich konstanter Verstärkung verwendet werden kann, definiert man die Frequenz, bei welcher die Verstärkung um einen bestimmten Faktor angestiegen ist, als die obere Frequenzgrenze, bis zu welcher der Accelerometer verwendet werden kann. Die Beziehung zwischen der Frequenz der angelegten Beschleunigung und der Verstärkung wird hier als die Verstärkungscharakteristik bezeichnet.

In jedem dynamischen System, für welches der Accelerometer nur ein Beispiel ist, steigt die Verzögerung des Systemes in dem Masse, in dem die zeitliche Variation des Eingangssignales schneller wird, was eine Phasenverschiebung zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangssignal bewirkt. In ähnlicher Art wie bei der Verstärkung, wird die Frequenz, bei der die Phasenverzögerung eine zulässige Grenze übersteigt, als die obere Grenzfrequenz für die Phase bezeichnet.

Im Inneren eines Objektes, an welches ein Accelerometer befestigt ist, werden elastische und plastische Wellen erzeugt, wenn das Objekt einem Stoss ausgesetzt wird. Bei der Messung von Stossbeschleunigungen zur Analyse von Brüchen, wird das die Beschleunigung darstellende Ausgangssignal manchmal durch einen elektrischen Filter geführt, um die Wirkung der elastischen Welle zu eliminieren. Wenn die Phase des Ausgangssignales des Filters berücksichtigt werden muss, ist es unumgänglich eine a priori Kenntnis der Beziehung zwischen der Phasenverzögerung und der Frequenz des Ausgangssignales des Accelerometers selbst zu haben, d.h. eine Kenntnis der Phasencharakteristik. In Fällen, bei denen das Ausgangssignal des Accelerometers als ein Auslösesignal verwendet wird und zeitlich sehr genau stimmen muss, wird es ausserdem unmöglich eine Phasenkompensation oder andere ähnliche Methoden zu verwenden, wenn man die Phasencharakteristiken nicht kennt.

Es ist daher für die Kalibrierung eines Stoss-Accelerometers notwendig, sowohl die Verstärkungscharakteristik wie auch die Phasencharakteristik zu bestimmen.

Darstellung der Erfindung

Es ist das Ziel dieser Erfindung, ein Verfahren und einen Apparat zum Messen der dynamischen Charakteristiken eines Stoss-Accelerometers zu schaffen, welche eine genaue und einfache Messung der Verstärkungs- und der Phasencharakteristiken des Stoss-Accelerometers gestatten.

Zu diesem Zweck ist die Erfindung, wie in den Ansprüchen 1 und 6 beschrieben, definiert.

Im folgenden soll die Erfindung durch eine, auf die Zeichnungen gestützte Beschreibung näher erläutert werden.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Fig. 1 ist eine schematische Ansicht eines Apparates zur Ausführung des erfindungsgemässen Verfahrens zum Messen der dynamischen Charakteristiken eines Stoss-Accelerometers.

Fig. 2 ist eine schematische Ansicht eines Apparates um dem in Fig. 1 gezeigten Stab einen Stoss zu erteilen.

Fig. 3 (a) zeigt graphisch die Wellenform einer mit einem Dehnungsmesser gemessenen elastischen Welle.

Fig. 3 (b) zeigt graphisch die Wellenform einer Spannungswelle, die verwendet wird, um die Beschleunigung zu berechnen, die auf den Accelerometer ausgeübt wird.

Fig. 3 (c) zeigt graphisch ein Beispiel einer Wellenform am Ausgang des zu prüfenden Accelerometers.

Fig. 4 ist ein Flussdiagramm, welches die Schritte zeigt, die notwendig sind um aus den Ausgangssignalen des Accelerometers und eines Dehnungsmessers die Verstärkungs- und Phasencharakteristiken des Accelerometers zu gewinnen.

Fig. 5 zeigt graphisch die Beschleunigung der Endfläche eines Stabes, so wie sie aus den Ausgangssignalen eines Dehnungsmessers und eines Accelerometers (B&K, Modell 4393) berechnet wurde.

Fig. 6 (a) zeigt graphisch einen einfallenden Impuls, der gemäss der vorliegenden Erfindung durch ein Dehnungsmesser festgestellt wird.

Fig. 6 (b) zeigt graphisch die Wellenform am Ausgang eines nach dem erfindungsgemässen Verfahren geprüften Accelerometers.

Fig. 7 (a) zeigt graphisch das Spektrum des wellenförmigen Signales der Fig. 6 (a).

Fig. 7 (b) zeigt graphisch das Spektrum des wellenförmigen Signales der Fig. 6 (b).

Fig. 8 (a) zeigt graphisch die aus den in den Fig. 6 (a) und (b) gezeigten Signalen nach dem erfindungsgemässen Verfahren bestimmten Verstärkungscharakteristiken eines Accelerometers.

Fig. 8 (b) zeigt graphisch die aus den in Fig. 5 (a) und (b) gezeigten Signalen durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmten Phasen-Charakteristiken eines Accelerometers.

Fig. 9 (a) zeigt graphisch die Verstärkungscharakteristiken eines Accelerometers B&K, Modell 8309, wie sie durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmt wurden, und Fig. 9 (b) zeigt graphisch die durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmten Phasencharakteristiken desselben Accelerometers.

Fig. 10 (a) zeigt graphisch die durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmten Verstärkungscharakteristiken eines Endevco Modells 2271A Accelerometers und Fig. 10 (b) zeigt graphisch die durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmten Phasencharakteristiken desselben Accelerometers.

Fig. 11 (a) zeigt graphisch die durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmten Verstärkungscharakteristiken eines Endevco Modells 2270 Accelerometers, und Fig. 11 (b) zeigt graphisch die durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmten Phasencharakteristiken desselben Accelerometers.

Fig. 12 (a) zeigt graphisch die durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmten Verstärkungscharakteristiken eines Kistler Modell 8005 Accelerometers, und Fig. 12 (b) zeigt graphisch die durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmten Phasencharakteristiken desselben Accelerometers.

Fig. 13 (a) zeigt graphisch die durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmten Verstärkungscharakteristiken eines Columbia Modell 383 Accelerometers, und Fig. 13 (b) zeigt graphisch die durch das erfindungsgemässe Verfahren bestimmten Phasencharakteristiken desselben Accelerometers.

Weg zur Ausführung der Erfindung

Fig. 1 ist ein Blockdiagramm einer Ausführungsform des erfindungsgemässen Apparates zur Messung der dynamischen Charakteristiken eines Stoss-Accelerometers. Der Apparat umfasst einen Stab 2, der so auf einem Tisch 9 gelagert ist, dass er in axialer Richtung verschiebbar ist. Ein zu prüfender Accelerometer 4 ist mittels einer (nicht gezeigten) Schraube oder dergleichen an einer Endfläche 2a des Stabes 2 befestigt. Ein Halbleiter-Dehnungsmesser 3 mit guten Aufnahmecharakteristiken und kleinem Rauschen ist in einer vorgeschriebenen Entfernung ℓ der Endfläche 2a am Stab 2 angebracht, an welchem der Beschleunigungsmesser 4 befestigt ist. Da der Boden des Accelerometers, an welchem der Stab 2 befestigt ist, im allgemeinen aus rostfreiem Stahl oder Titan besteht, ist der Stab 2 vorzugsweise aus Stahl, rostfreiem Stahl oder einem ähnlichen Material gefertigt, welches eine akustische Impedanz hat, die gleich oder grösser derjenigen dieser Materialien ist. Falls der verwendete Stab einen kreisförmigen Querschnitt hat, sollte er vorzugsweise eine Länge von zehnmal seinem Durchmesser oder mehr haben, da das Verhältnis von Durchmesser zu Länge so sein muss, dass die fortgepflanzte elastische Welle als eine eindimensionale Welle betrachtet werden kann.

Der Dehnungsmesser 3 wird in einer Entfernung ℓ der Endfläche 2a angebracht, so dass er zwischen der in Richtung der Endfläche 2a laufenden elastischen Welle (Druckwelle) und der von der Endfläche 2a des Stabes 2 zurückgeworfenen elastischen Welle (Spannungswelle) unterscheiden kann.

Nachdem der zu prüfende Accelerometer 4 und der Dehnungsmesser 3 in der beschriebenen Weise am Stab 2 angebracht worden sind, wird ein geeignetes Objekt 2b in Kollision mit der anderen Endflä-

che 2b des Stabes 2 gebracht, um einen Stoss zu erzeugen. Dieser Stoss dient dazu, im Stab 2 eine elastische Welle zu erzeugen, und Fig. 2 zeigt, wie dies beispielsweise erreicht werden kann. Ein Geschoss 1 mit konischer Spitze wird in ein Abschussrohr 10 eingebracht, und durch Öffnen des Ventiles wird Druckluft in das Abschussrohr eingelassen, wodurch das Geschoss 1 beschleunigt wird, und mit der Endfläche 2b des Stabes 2 kollidiert, der vor der Mündung des Abschussrohres positioniert wurde, wodurch im Stab 2 eine elastische Welle erzeugt wird. Es ist dies eine bevorzugte Methode, da die Auftreffgeschwindigkeit des Geschosses 1 mittels Laserstrahlen mit grosser Präzision gemessen werden kann. Eine grosse Anzahl anderer Verfahren kann anstatt der oben erwähnten Druckluft verwendet werden, um das Geschoss 1 zu beschleunigen. So kann es beispielsweise elektromagnetisch, durch statische Elektrizität, mittels Sprengstoff, durch die Schwerkraft, oder durch in einem elastischen Körper gespeicherte Energie beschleunigt werden. Sofern man dabei die Auftreffgeschwindigkeit ohne Einschränkung kontrollieren kann, und eine elastische Welle im Stab 2 erzeugen kann, ist es auch möglich eine Anzahl weiterer Methoden zu verwenden, indem beispielsweise die elastische Welle im Stab 2 dadurch erzeugt wird, dass die Endfläche 2b des Stabes mit einem Hammer geschlagen wird, dass ein piezoelektrisches Element an die Endfläche 2b befestigt wird und eine elastische, impulsartige Welle erzeugt wird, indem man das piezoelektrische Element mit einer Spannung erregt, dass ein starker Laserstrahl-impuls auf die Endfläche 2b gerichtet wird, und im Stab 2 durch augenblickliche thermische Ausdehnung eine impulsartige elastische Welle erzeugt, oder dass eine Stoss- oder Schockwelle in einem Gas erzeugt wird, indem ein Sprengstoff zur Explosion gebracht wird oder indem ein Schockrohr auf die Endfläche 2b auftrifft. Es sollte der Stab im Augenblick, in dem der Stoss seine Endfläche trifft, keine plastische Deformation erleiden, und in dieser Hinsicht ist eine hinreichende Sorgfalt notwendig. Wenn der Stoss beispielsweise durch das Auftreffen eines Geschosses erzeugt wird, wird eine plastische Deformation des Stabes dadurch vermieden, dass das Geschoss aus einem Material, beispielsweise Aluminium, gefertigt ist, das in hinreichendem Masse weicher als das für den Stab gewählte Material ist.

Die Auftreffgeschwindigkeit auf die Endfläche des Stabes wird nach Massgabe der Charakteristiken des Stoss-Accelerometers passend gewählt.

Wie vorangehend erklärt, wird im Inneren des Stabes 2 eine elastische Welle erzeugt, wenn ein Stoss auf die Endfläche 2b desselben ausgeübt wird. Diese Welle pflanzt sich in Richtung der Endfläche 2a fort, an welcher das Accelerometer 4 befestigt ist. Wenn die elastische Welle die Endfläche 2a erreicht und von dieser reflektiert wird, dann wird, wie in Gleichung (1) gezeigt, an der Endfläche 2a eine Beschleunigung $a(t)$ erzeugt, welche gleich dem doppelten Produkt der Fortpflanzungsgeschwindigkeit C der elastischen Welle, mit der zeitlichen Ableitung der Dehnung $\dot{\epsilon}$ nahe der Endfläche ist. Diese Beschleunigung $a(t)$ ist die Beschleunigung, welche auf das Accelerometer 4 wirkt, das an der Endfläche 2a befestigt ist,

$$a(t) = 2C\dot{\epsilon} \quad (1)$$

wo $a(t)$ die Beschleunigung an der Endfläche 2a ist, an welcher das Accelerometer 4 befestigt ist.

Da der Dehnungsmesser 3 in einem Abstand ℓ von der Endfläche 2a am Stab 2 befestigt ist, wird die Beziehung zwischen der von dem Dehnungsmesser 3 gemessenen Dehnung, und der Beschleunigung $a(t)$ an der Endfläche 2a durch Gleichung (2) gegeben.

$$a(t) = 2C\dot{\epsilon}(t - \ell/C) \quad (2)$$

Demnach wird die Beschleunigung $a(t)$, die in Gleichung (2) berechnet ist, zum Eingangssignal für das an der Endfläche 2a befestigte Accelerometer 4.

Wie in Fig. 3 (a) gezeigt, nimmt die Wellenform der durch den Dehnungsmesser 3 gemessenen Dehnungswelle zuerst, d.h. zwischen den Zeiten t_a und t_b , die elastische Wellenform W_1 einer in Richtung der Endfläche 2a bewegten Druckwelle, und dann, zwischen den Zeiten t_c und t_d , nimmt sie die Wellenform W_2 einer von der Endfläche 2a reflektierten Spannungswelle an. Zwischen den Zeiten t_c und t_d ist die Wellenform diejenige einer durch Reflektion an der Endfläche 2a erzeugten Dehnungswelle, und da sie sich in Richtung der Endfläche 2b bewegt, an welcher der Aufprall stattfand, beeinflusst sie die Erzeugung der Beschleunigung, welche auf das Accelerometer ausgeübt wird, nicht. Die Ableitung $\dot{\epsilon}$ der Dehnung, die verwendet wird, um mittels Gleichung (2) die Beschleunigung zu berechnen, die auf das Accelerometer 4 ausgeübt wird, wird vom Dehnungssignal (ϵ_m) der Wellenform W_1 der Kompressionswelle abgeleitet, die in Fig. 3 (b) zwischen den Zeiten t_a und t_b erscheint. Fig. 3 (b) zeigt ein Beispiel des nach Empfang des oben erwähnten Signales durch den Accelerometer 4 erzeugten Ausgangssignales $a_m(t)$. Dieses Ausgangssignal wird durch einen Verstärker 6 verstärkt, durch einen Wellenspeicher 7, der sowohl als Analog-Digitalwandler wie als Speicher wirkt, in ein digitales Signal verwandelt, im Speicher gespeichert und der Datenverarbeitungseinheit 8 zugeführt. In ähnlicher Weise wird das Ausgangssignal des Dehnungsmessers 3 durch einen Verstärker 5 verstärkt, in ein digitales Signal verwandelt und im Wellenspeicher 7 gespeichert sowie der Datenverarbeitungseinheit 8 zugeführt.

In der datenverarbeitenden Einheit 8 wird das Ausgangssignal $a_m(t)$ des Accelerometers 4 und das Signal $\dot{\epsilon}_m$ des Dehnungsmessers, d.h. das Signal, welches der Druckwelle nach Abzug der Spannungswelle am Ausgang des Dehnungsmessers 3, verwendet, um die Verstärkungscharakteristiken und die

Phasencharakteristiken des Accelerometers nach Massgabe der untenstehenden Gleichung (3) zu berechnen.

Die Berechnung der Verstärkungscharakteristiken und der Phasencharakteristiken des Accelerometers ist effektiv genau dasselbe, wie die Berechnung dessen, was bei Steuerkreisen als die Transferfunktion $G(\omega)$ bezeichnet wird. Die Transferfunktion ist als diejenige Funktion definiert, die man bei Division der Laplace transformierten des Ausgangssignales eines linearen Systemes durch die Laplace transformierte des Eingangssignales desselben Systemes erhält. Um also die Transferfunktion eines Accelerometers zu erhalten, genügt es die Laplace transformierte des Ausgangssignales, das der Accelerometer erzeugt, wenn er eine bekannte Beschleunigung erleidet, durch die Laplace transformierte der eingegebenen Beschleunigung zu dividieren.

Insbesondere hat man, wenn $a_m(t)$ das am Ausgang des Accelerometers 4 auftretende Beschleunigungssignal, und $G(\omega)$ die Transferfunktion des Accelerometers 4 ist:

$$L[a_m(t)] = G(\omega) \cdot L[2C\dot{\epsilon}_m(t-\ell/C)] \quad (3)$$

wo ω die Winkelfrequenz, und $L[a_m(t)]$ der Transformationsoperator von Laplace ist. Während die Gleichung (3) mathematisch eine Laplace transformierte ist, ist sie numerisch dasselbe, wie eine schnelle Fourier transformierte. Des weiteren ist, in Anbetracht der Frequenzbandbreite des Beobachtungssystemes und dergleichen, eine physikalisch wirksame obere Frequenzgrenze in der Fourier transformierte vorhanden. Komponenten des Signales im Gebiet oberhalb dieser oberen Grenzfrequenz werden eliminiert. Anders ausgedrückt, ist dies eine Filterberechnung. Da die tatsächlich gemessene physikalische Grösse die Dehnung ist, und nicht die zeitliche Ableitung der Dehnung, kann Gleichung (3) umgeschrieben werden, indem man die Ableitungseigenschaften der Laplace transformierten verwendet, um die Transferfunktion $G(\omega)$ des Accelerometers in folgender Form zu erhalten:

$$G(\omega) = \frac{L[a_m(t)]}{j2\omega CL[\dot{\epsilon}_c(t-\ell/C)]} \quad (4)$$

wobei j die imaginäre Einheit ist.

Die Verstärkungscharakteristik $g(\omega)$ des Beschleunigungsmessers kann aus Gleichung (4) in folgender Form erhalten werden:

$$g(\omega) = G(\omega) \quad (5)$$

Da der Dehnungsmesser 3 in einem Abstand ℓ der Endfläche $2a$ angemacht ist, muss eine Kompensation durchgeführt werden, um die Dispersion zu berücksichtigen. Dies geschieht mit Hilfe von Skalak's Analyse (Journal of Applied Mechanics, März 1957, S. 59-64). Wenn man die durch diese Analyse erhaltene Spannungs-Wellenform an der freien Endfläche $2a$ als $\epsilon_t(t)$ definiert, und die unter denselben Bedingungen wie in Skalak's Analyse effektiv durch den Dehnungsmesser gemessene Wellenform mit $\epsilon_g(t)$ bezeichnet, dann wird der Kompensationskoeffizient $K(\omega)$ zu:

$$K(\omega) = \frac{L[\epsilon_g(t-\ell/C)]}{L[\epsilon_t(t)]} \quad (6)$$

Demzufolge wird die kompensierte Verstärkungscharakteristik $g_c(\omega)$ des Accelerometers:

$$g_c(\omega) = K(\omega)g(\omega) \quad (7)$$

Da die Phasencharakteristik des Accelerometers 4 einfach die Beziehung zwischen der Phase der Transferfunktion und der Frequenz ist, kann die Phasencharakteristik $\emptyset(\omega)$ aus der Gleichung (4) erhalten werden:

$$\emptyset(\omega) = \arg[G(\omega)] \quad (8)$$

während der Phasen-Kompensationskoeffizient $K(\omega)'$ ausgedrückt werden kann als:

$$K(\omega)' = \arg\{L[\epsilon_g(t-\ell/C)]/L[\epsilon_t(t)]\} \quad (9)$$

Es wird also die kompensierte Phasencharakteristik $\varnothing_c(\omega)$ des Accelerometers:

$$\varnothing_c(\omega) = \varnothing(\omega) + K(\omega) \quad (10)$$

Die in der Datenverarbeitungseinheit 8 aufgrund des Ausgangssignales des Accelerometers 4 und des Ausgangssignales des Dehnungsmessers 3 ausgeführte Berechnung kann in Form eines Flussdiagrammes dargestellt werden, wie in Fig. 4 gezeigt. Da das vom Wellenspeicher 7 erhaltene Dehnungsmesserausgangssignal eine Druckwellenkomponente und eine Dehnungswellenkomponente enthält, wird nur die Druckwellenkomponente extrahiert und verwendet, um im weiteren Verlauf die durch die Entfernung zwischen dem Dehnungsmesser 3 und der Endfläche 2a bewirkte Phasenverschiebung zu berechnen. Andererseits wird, wenn nötig, die Fourier transformierte Komponente aus dem Ausgangssignal des Accelerometers 4 extrahiert, und die beiden Signale nach Massgabe von Gleichung (3) transformiert; danach werden die zugehörigen Signalkomponenten im Gebiet jenseits der auf der Frequenzbandweite und dem dynamischen Bereich des Verstärkers und der Wellenspeichereinheit beruhenden Grenzen entfernt.

Das demassen verarbeitete Signal wird dann zur Berechnung der Transferfunktion nach Gleichung (4) verwendet, wonach die Verstärkungscharakteristik aufgrund der Gleichungen (5), (6) und (7), und die Phasencharakteristik aufgrund von Gleichungen (8), (9) und (10), berechnet werden.

Aus den in der beschriebenen Weise erhaltenen Verstärkungscharakteristiken und Phasencharakteristiken kann man die obere Frequenzgrenze und die Resonanzfrequenz des geprüften Accelerometers bestimmen, und damit kann das Gebiet gefunden werden, innerhalb von welchem der Accelerometer verwendbar und zuverlässig ist.

Es sollen nunmehr spezielle Anwendungen der Erfindung beschrieben werden.

Ein Stab aus rostfreiem Stahl (SUS 304) mit einem kreisförmigen Querschnitt von 30 mm Durchmesser und einer Länge von 2000 mm wurde auf vier Kugellager-Kugeln gelagert, so dass er in axialer Richtung bewegbar ist. Ein Stoss Accelerometer des Modelles B&K Modell 4393, hergestellt von Brüel & Kjaer wurde als Prüfling gewählt und mit M3 Schrauben und einem Drehmoment von 1,1 N/m an einer Endfläche dieses Stabes befestigt; zwei Dehnungsmesser (Modell KSK-2-E4-11, hergestellt von Kyowa Dengyo aus Japan, und mit einem elektrischen Widerstand von 122 Ohm) mit einer Länge von 2 mm wurden einander gegenüber auf dem Stab befestigt, in 625 mm Entfernung von derselben Endfläche.

Ein Abschussrohr aus rostfreiem Stahl mit einem Innendurchmesser von 14,8 mm und 1500 mm Länge wurde in der in Fig. 2 gezeigten Weise gegenüber der anderen Endfläche des Stabes aufgestellt. Ein aus Reinaluminium bestehendes Projektil von 14,6 mm Durchmesser und 100 mm Länge, mit einer konischen Spitze mit einem eingeschlossenen Winkel von 150° wurde in das Abschussrohr eingeführt, und durch Druckluft angetrieben, um mit der hinteren Endfläche des Stabes zu kollidieren. Die Auftreffgeschwindigkeit des Projektils war gleich 10,0 m/sek., gemessen anhand der Zeit, die das Projektil brauchte, um die Strecke zwischen zwei Laserstrahlen zurückzulegen.

Die im Stab erzeugte elastische Welle wurde durch den Dehnungsmesser festgestellt, und das entsprechende Ausgangssignal wurde über eine Brückenschaltung und einen Gleichstromverstärker zwecks Speicherung einer Wellenspeichereinheit zugeführt. Das Ausgangssignal des am Stabe befestigten Accelerometers wurde über einen Ladungsverstärker zwecks Speicherung der Wellenspeichereinheit zugeführt.

Die graphische Darstellung der Fig. 5 zeigt das wellenförmige Ausgangssignal des Accelerometers im vorangehenden Experiment (Kurve 21) und die zeitlichen Änderungen der Beschleunigung der Endfläche 2a, berechnet nach Gleichung (2) aus den Ausgangssignalen des Dehnungsverstärkers (Kurve 22). Wenngleich das Ausgangssignal des Accelerometers ein Überschwingen aufweist, von dem angenommen wird, dass es durch Resonanz entsteht, so stimmt sein Verhalten, abgesehen von diesem Überschwingen, gut mit der berechneten Beschleunigung überein. Daraus kann geschlossen werden, dass Gleichung (2) im wesentlichen gültig ist.

Fig. 6 (a) zeigt den von dem Dehnungsmesser gemessenen Eingangsimpuls, und Fig. 6 (b) zeigt das von dem an der Endfläche angebrachten Accelerometer erzeugte Ausgangssignal. Aus Fig. 6 (a) kann ersehen werden, dass die Dauer des eintreffenden Impulses so ungefähr 113 μ s betrug, und dass die Dehnungsspitze gleich -77×10^{-6} war. Aus Fig. 6 (b) kann man ersehen, dass das Ausgangssignal des Accelerometers eine positive Beschleunigungsspitze von $+4,1 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ und eine negative Beschleunigungsspitze von $-1,8 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ aufweist.

Die Fig. 7 (a) und (b) zeigen die Spektren der in den Fig. 6 (a) respektive 6 (b) gezeigten Signale. Die gestrichelte Linie zeigt die Grenze des dynamischen Gebietes, die durch die Auflösung des 8-bit A/D Wandlers in der Wellenspeichereinheit gegeben ist. Genauer gesagt haben in der Wellenspeichereinheit gespeicherte Signale mit einer Frequenzbreite dessen Spektrum über diesen gebrochenen Linien liegt, eine physikalische Bedeutung.

Das Ergebnis dieses Versuches ist, dass, wie in Fig. 7 (a) gezeigt, das Signal des Dehnungsmessers im Bereich von 1 kHz – 70 kHz gültig ist, und dass, wie in Fig. 2 (b) gezeigt, das Beschleunigungssignal im Bereich 1 kHz – 147 kHz gültig ist.

Fig. 8 (a) zeigt die Verstärkungscharakteristiken des Accelerometers nach Kompensation für die

Dispersion der elastischen Welle, gestützt auf den Kompensationskoeffizient der Gleichung (6). Fig. 8 (b) zeigt die kompensierten Phasencharakteristiken des Accelerometers.

Aus der Fig. 8 (a) ersieht man, dass die Resonanzfrequenz des geprüften B&K Modell 4393 Stoss-Accelerometers 52 kHz betrug, dass die obere Grenzfrequenz unterhalb der der Stoss-Accelerometer gebraucht werden konnte, 16 kHz bezüglich der Verstärkung, und 33 kHz bezüglich der Phase war. Die technischen Daten des Herstellers gaben eine montierte Resonanzfrequenz von 55 kHz und eine obere Grenzfrequenz von 17 kHz an.

Die Verstärkungs- und Phasencharakteristiken eines B&K Modelles 8309, eines Endevco Modelles 2271A, eines Endevco Modelles 2270, eines Kistler Modelles 8005 und eines Columbia Modelles 383 wurden unter Verwendung derselben Apparatur wie im oben beschriebenen Experiment getestet, wobei nur das Projektil für jeden Test ausgewechselt wurde.

Tabelle 1 zeigt die Art der Schrauben, welche verwendet wurden um jeden Accelerometer auf der Endfläche des Stabes zu montieren, den Drehmoment der Schrauben, die Auftreffgeschwindigkeit des Geschosses, den eintreffenden Impuls, und die Spitzenbeschleunigung, während Tabelle 2 die Resonanzfrequenz in montiertem Zustand und die obere Grenzfrequenz für jeden Accelerometer zeigt, zusammen mit den entsprechenden technischen Daten des Herstellers. Die Verstärkungs- und Phasencharakteristiken, die für das B&K Modell 8309 gefunden wurden, sind in Fig. 9 (a) und 9 (b) gezeigt. Diejenigen, die für das Endevco-Kurvenmodell 2271A gefunden wurden, sind in den Fig. 10 (a) und (b) gezeigt, die für das Endevco-Modell 2270 gefunden sind, in den Fig. 11 (a) und 11 (b) gezeigt, die für das Kistler Modell 8005 sind in den Fig. 12 (a) und 12 (b) gezeigt, und die für das Columbia-Modell 383 gefundenen sind in den Fig. 13 (a) und 13 (b) gezeigt.

5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65

Tabelle 1					
Accelerometer	Montage Bolzen	Drehmoment	Stoss-Geschwindigkeit	Eintreffender Impuls Dauer	Spitzenwert der Beschleunigung (Ausgang des Accelerometers)
B&K 8309	M5	1,1 Nm	9,4 m/s	119 µs	+3,3 × 10 ⁴ m/s ² -1,4 × 10 ⁴ m/s ²
Endevco 2271A	10-32 UNF	2,3 Nm	9,8 m/s	117 µs	4,2 × 10 ⁴ m/s ² -1,6 × 10 ⁴ m/s ²
Endevco 2270	1/4-28	2,3 Nm	8,7 m/s	121 µs	+3,8 × 10 ⁴ m/s ² -1,5 × 10 ⁴ m/s ²
Kistler 8005	M8	2,3 Nm	8,8 m/s	115 ms	+2,9 × 10 ⁴ m/s ² -1,5 × 10 ⁴ m/s ²
Columbia 383	10,32 UNF	1,7 Nm	9,4 m/s	115 µs	+4,7 × 10 ⁴ m/s ² -1,9 × 10 ⁴ m/s ²

Tabelle 2				
Accelerometer	Resonanz-Frequenz wenn montiert	Ansprech-Frequenz (obere Grenze)	Daten des Herstellers	
Resultate der Erfindung		Resultate anhand der Erfindung	Daten des Herstellers	
		Verstärkung (+1dB)	Phase (-0,1rad)	
B&K 8309	63 kHz	180 kHz	27 kHz	34 kHz
Endevco 2271A	19 kHz	27 kHz	10 kHz	14 kHz
Endevco 2270	22 kHz	> 50 kHz	10 kHz	12 kHz
Kistler 8005	18 kHz	22 kHz	7 kHz	7 kHz
Columbia 383	49 kHz	80 kHz	15 kHz	20 kHz

In der Tabelle 1 wurde die obere Grenzfrequenz unterhalb derer ein Accelerometer verwendet werden kann, in Abhängigkeit der Verstärkung bestimmt, und zwar als die Frequenz unterhalb derer die Verstärkung mit zunehmender Frequenz um 1 dB zunimmt, und sie wurde aus der Phase als diejenige bestimmt, bei der die Phase am Accelerometerausgang um 0,1 rad verzögert ist.

Wie aus der vorangehenden Beschreibung ersichtlich ist, erlaubt die Erfindung die Messung der dynamischen Charakteristiken eines Stoss-Accelerometers unter Verwendung einer elastischen Welle, und ermöglicht eine einfache und zuverlässige Messung der dynamischen Charakteristiken von Accelerometern in Bereichen, in denen bisher kein Standard vorlag. Sie trägt daher wesentliches zur Kalibration von Accelerometern bei.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen der dynamischen Charakteristiken eines Stoss-Accelerometers, gekennzeichnet durch die folgenden Schritte: das Stoss-Accelerometer dessen dynamische Charakteristiken zu messen sind an eine erste Endfläche eines Stabes befestigen, Anbringen eines Dehnungsmessers am Stab, in einem bestimmten Abstand von der ersten Endfläche, um auf unabhängige Weise eine ankommende elastische Welle und eine reflektierte elastische Welle festzustellen, einer zweiten Endfläche des Stabes einen Stoss derart versetzen, dass sich eine elastische Welle durch den Stab fortpflanzt, dem Accelerometer als Beschleunigungs-Signal eine Beschleunigung erteilen, die auftritt, wenn sich die elastische Welle durch den Stab fortpflanzt und von der ersten Endfläche reflektiert wird, messen der dem Accelerometer erteilten Beschleunigung durch den Dehnungsmesser, der an einer von der ersten Endfläche beabstandeten Stelle angebracht ist, und Berechnen einer Verstärkungs-Charakteristik sowie einer Phasen-Charakteristik des Accelerometers aus den Ausgangs-Signalen des Accelerometers sowie des Dehnungsmessers.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Verstärkungs-Charakteristik und die Phasen-Charakteristik durch eine Datenverarbeitung berechnet wird, die eine Fouriertransformation der vom Accelerometer und vom Dehnungsmesser abgegebenen Signale umfasst.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die mittels der Fouriertransformation erhaltenen Werte auf Grund von Skalak's Analyse für die Dispersion der elastischen Wellen kompensiert werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei eine Druckwellenkomponente aus dem Ausgangs-Signal des Dehnungsmessers extrahiert wird.

5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die elastische Welle durch die Kollision eines Projektils mit der zweiten Endfläche des Stabes erzeugt wird.

6. Apparat zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, der folgende Teile aufweist: ein in axialer Richtung gleitend montierter Metallstab, an einer ersten Endfläche des Stabes vorgesehene Mittel, um einen Stoss-Accelerometer, dessen dynamische Charakteristiken zu messen sind, an einer ersten Endfläche des Stabes zu befestigen, damit ihm am Orte dieser ersten Endfläche eine Beschleunigung erteilt wird, ein an einer von der ersten Endfläche beabstandeten Stelle des Stabes angebrachter Dehnungsmesser, um die dem Accelerometer erteilte Beschleunigung zu messen, Mittel um einer zweiten Endfläche des Stabes einen Stoss zu erteilen, der darin eine elastische Welle erzeugt, und Datenverarbeitungs-Mittel, um anhand der infolge der elastischen Welle vom Stoss-Accelerometer und vom Dehnungsmesser abgegebenen Signale eine Verstärkungs- und eine Phasen-Charakteristik zu berechnen.

7. Apparat nach Anspruch 6, wobei der Stab einen kreisförmigen Querschnitt hat, und seine Länge mindestens das Zehnfache seines Durchmessers beträgt.

8. Apparat nach Anspruch 6, wobei der Stab aus Stahl oder aus rostfreiem Stahl besteht.

9. Apparat nach Anspruch 6, wobei der Dehnungsmesser an einer Stelle angebracht ist, an welcher die einfallende elastische Welle und die reflektierte elastische Welle unabhängig voneinander festgestellt werden können, wenn sich die elastische Welle bis zur ersten Endfläche fortpflanzt und von dieser reflektiert wird.

10. Apparat nach Anspruch 6, wobei die Mittel, um der zweiten Endfläche einen Stoss zu erteilen, ein Abschuss-Rohr, ein Geschoss, und Mittel zum Antreiben von letzterem aufweisen.

FIG.1

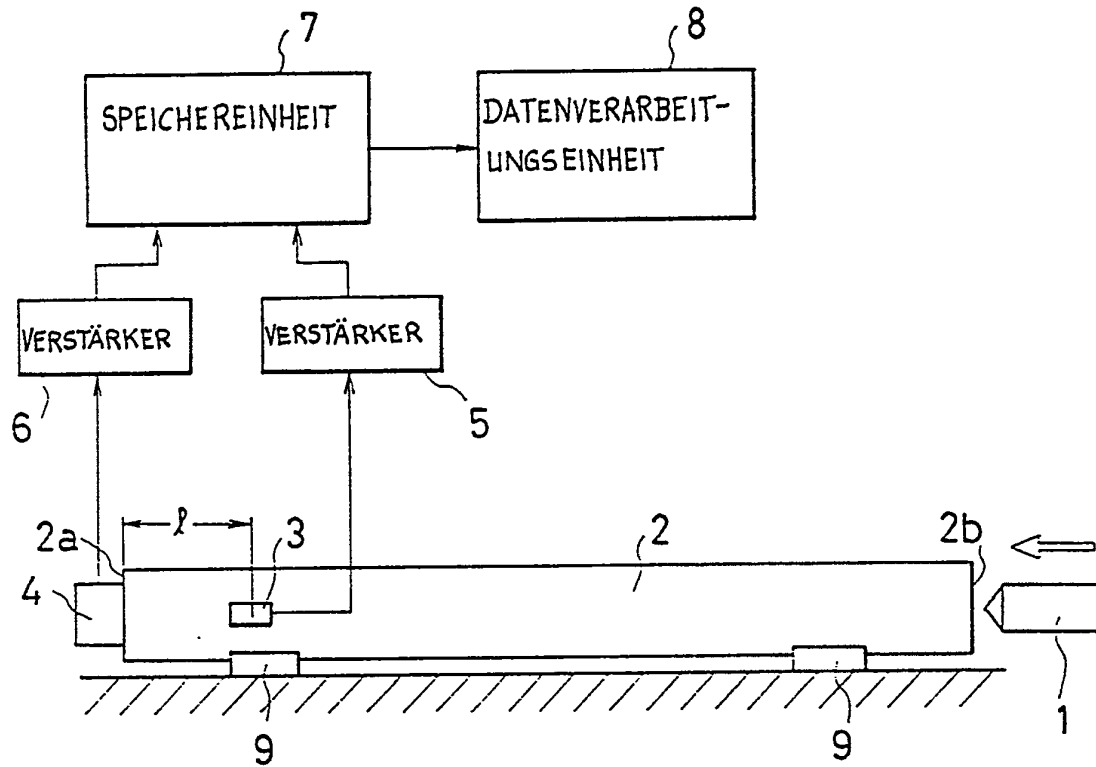


FIG.2

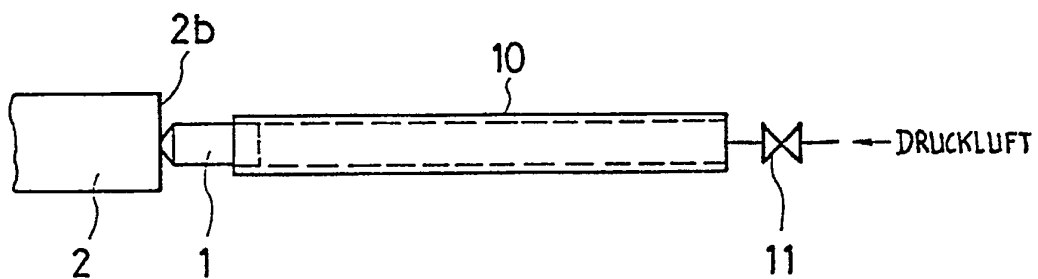


FIG.3(a)

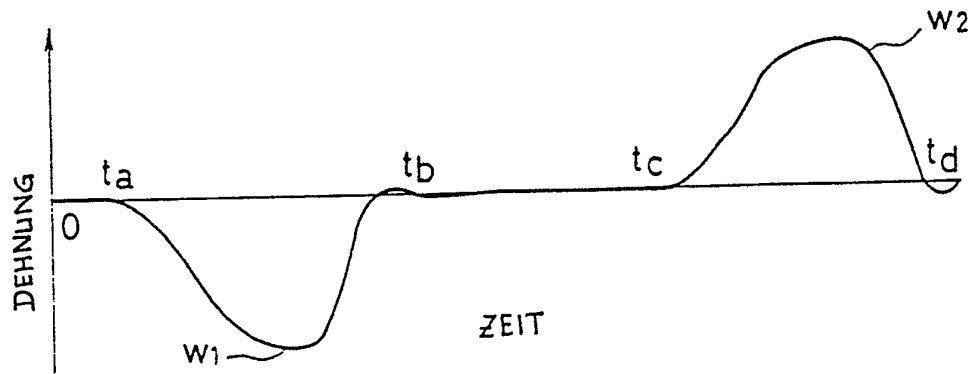


FIG.3(b)

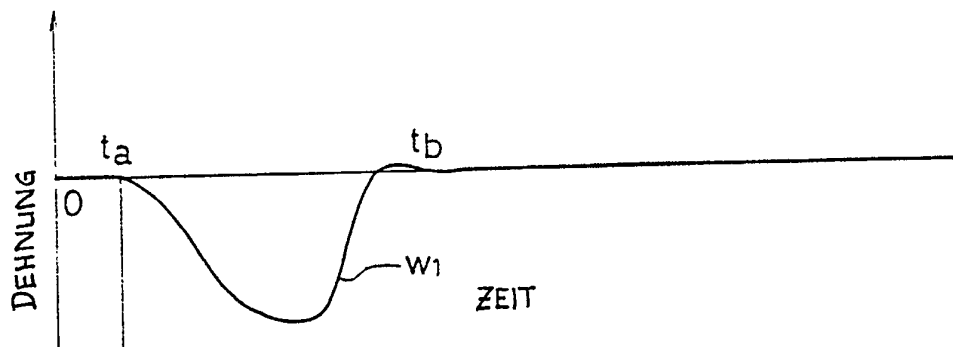


FIG.3(c)

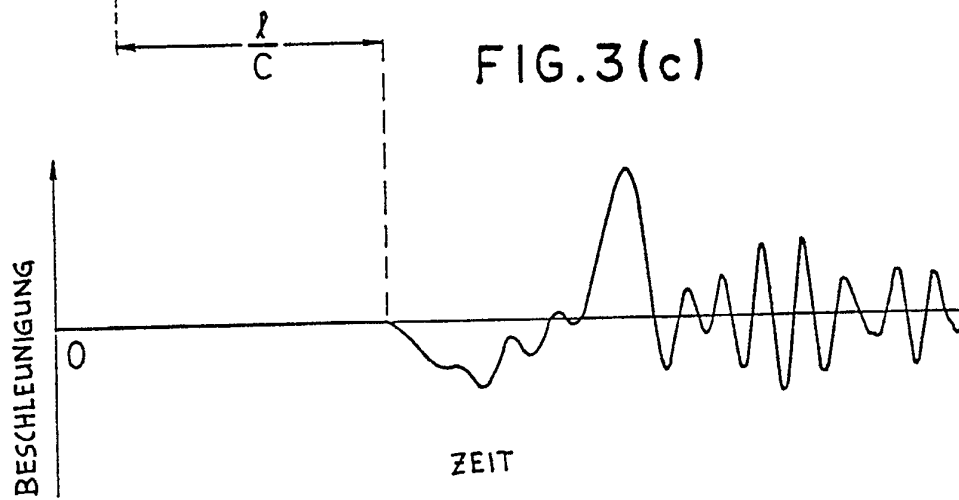


FIG. 4

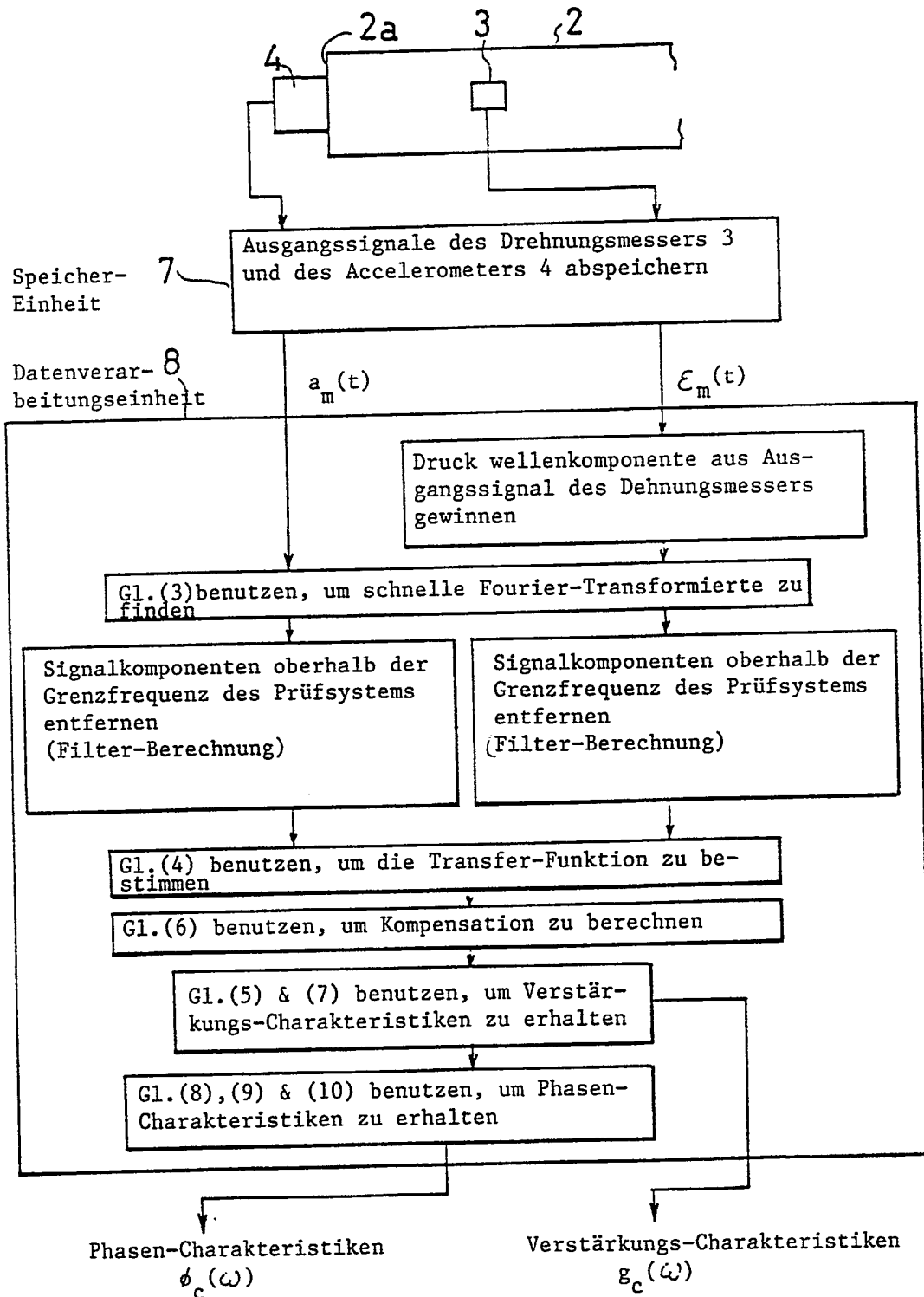


FIG. 5

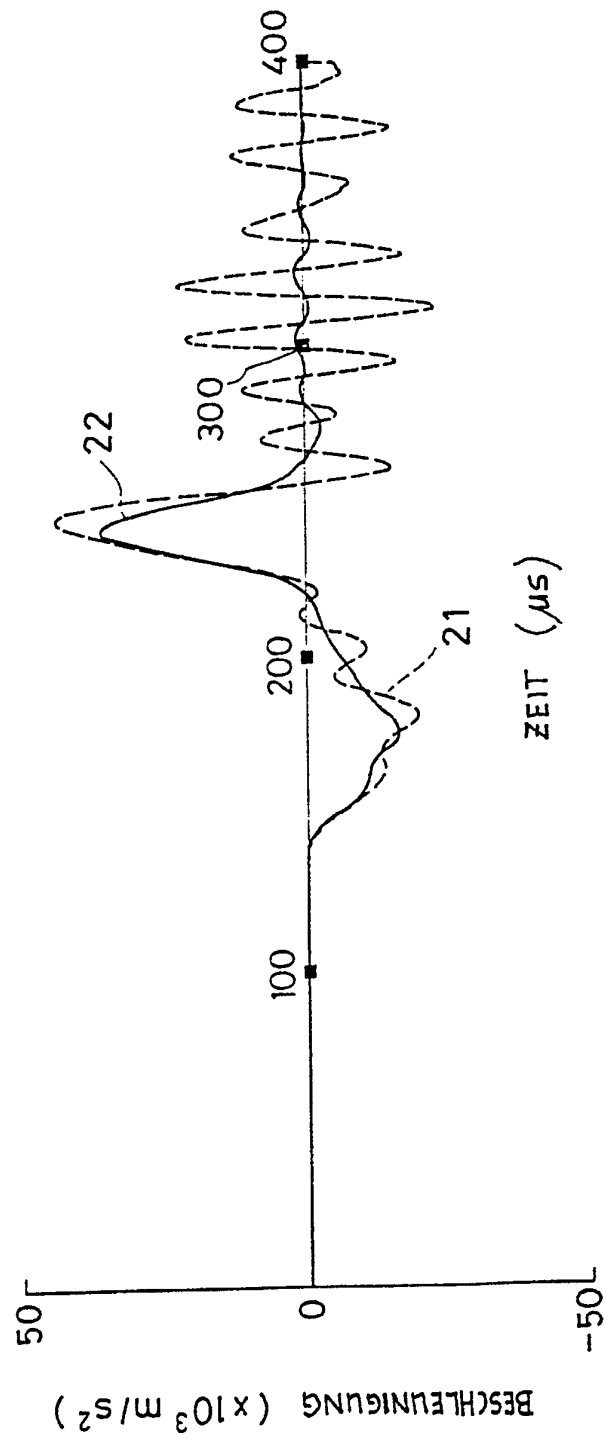


FIG. 6(a)

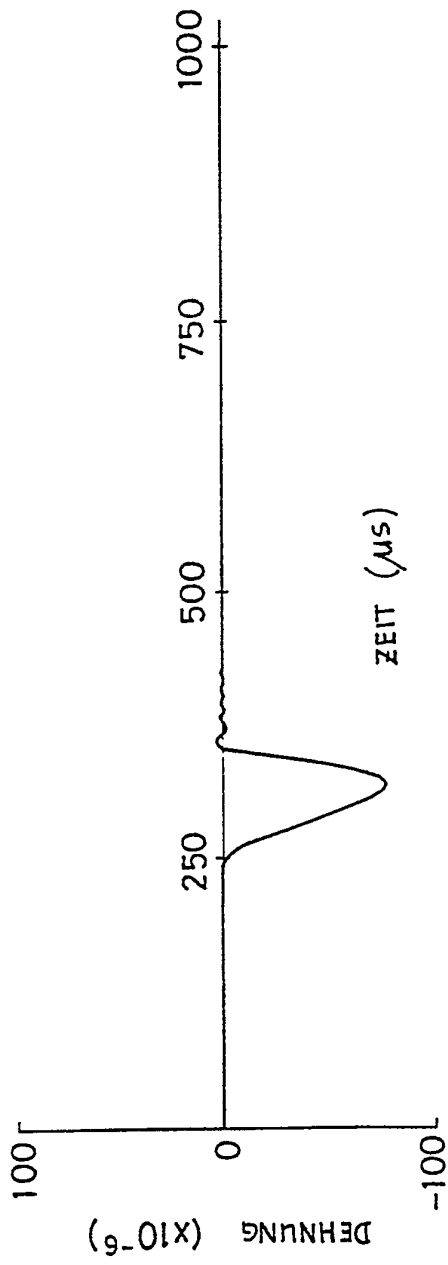


FIG. 6(b)

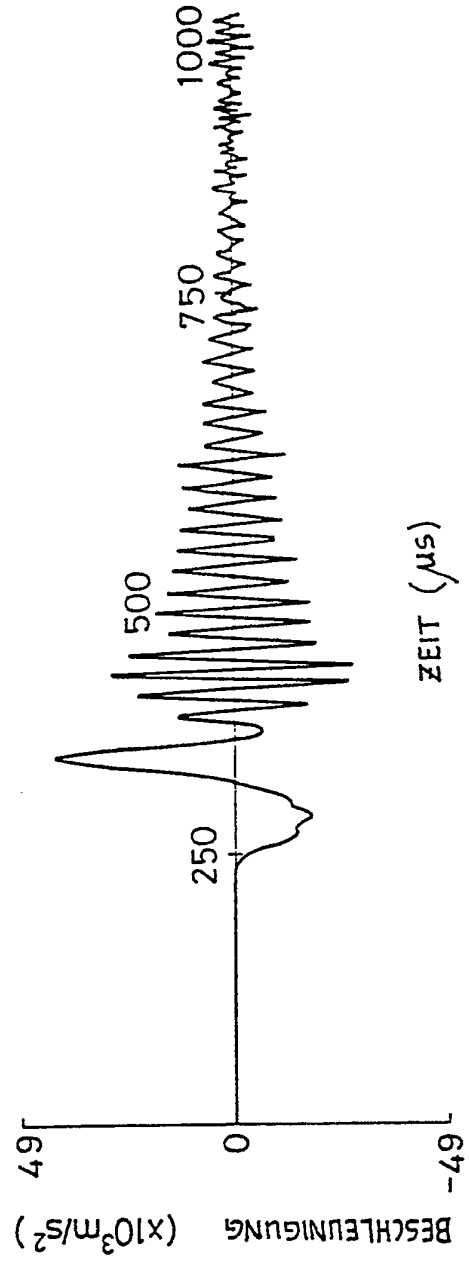


FIG.7(a)

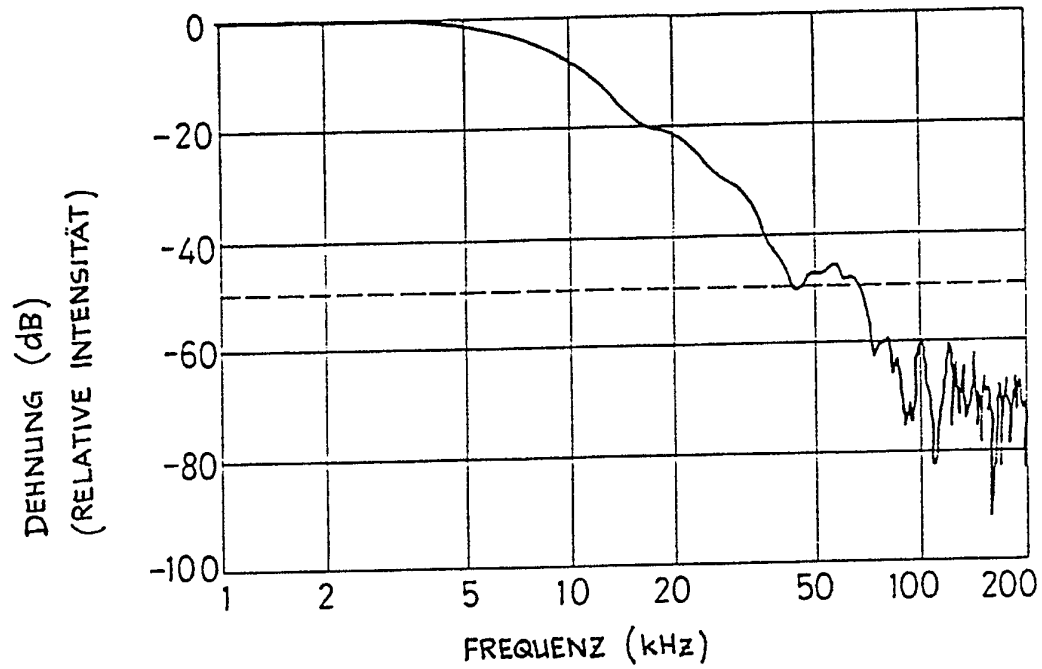


FIG.7(b)

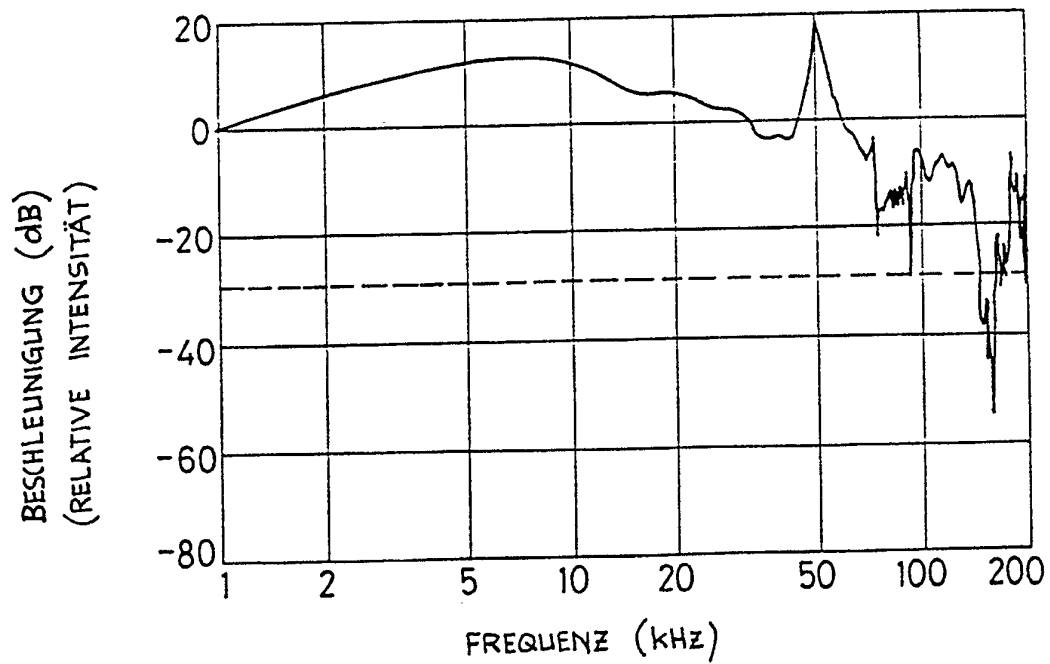


FIG.8(a)

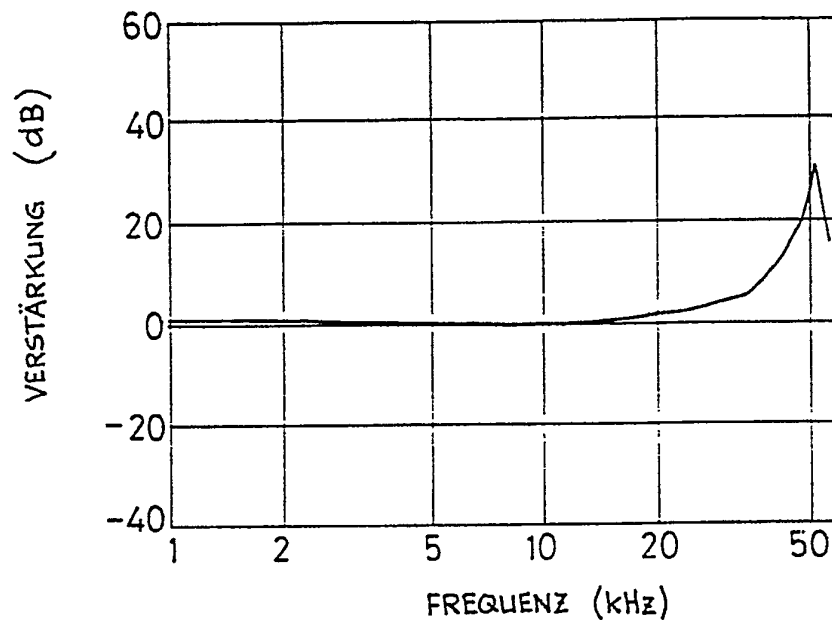


FIG.8(b)

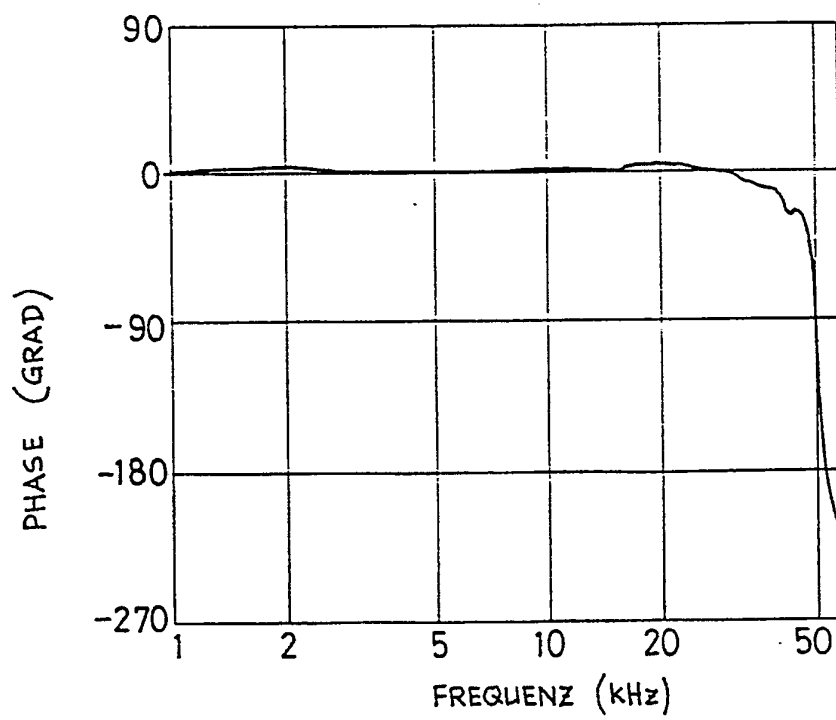


FIG.9(a)

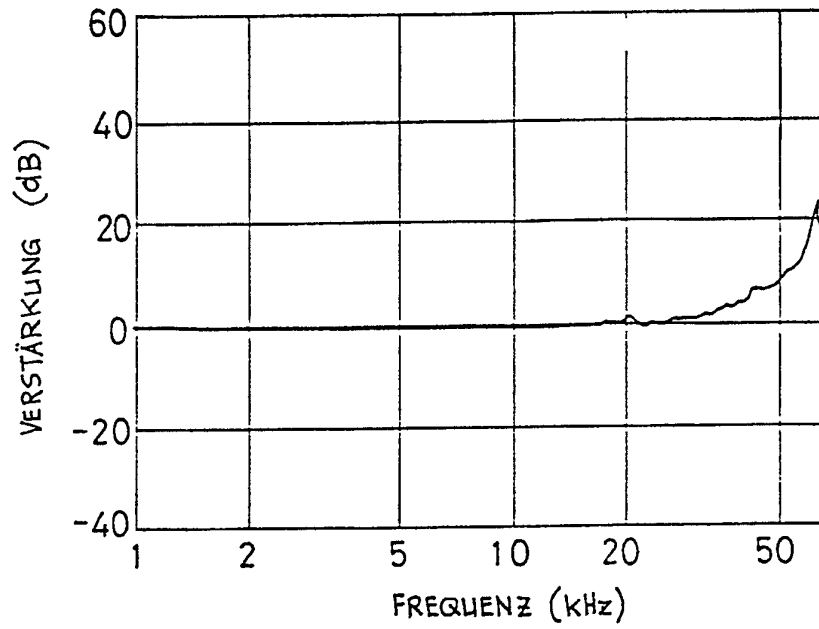


FIG.9(b)

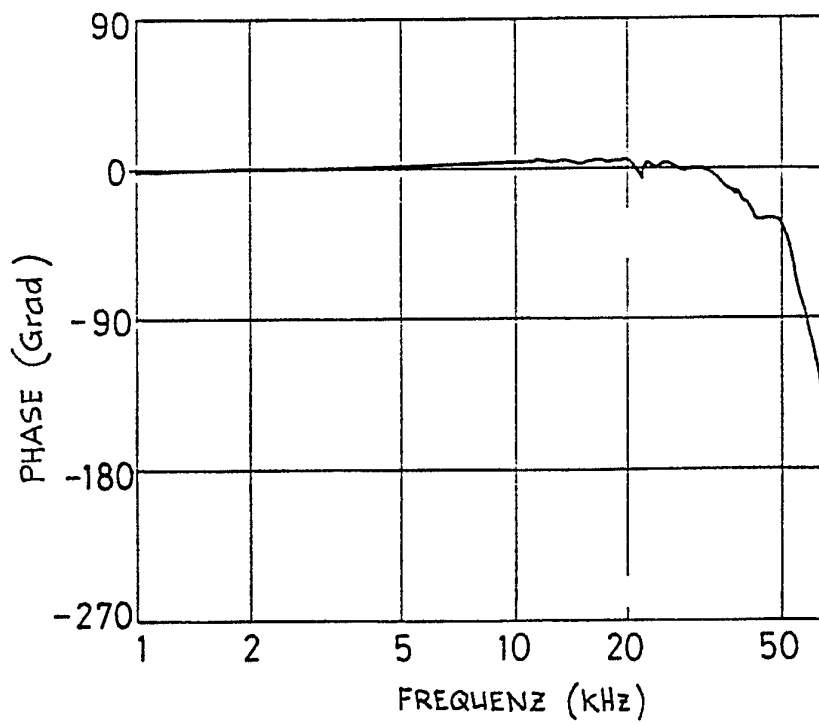


FIG.10(a)

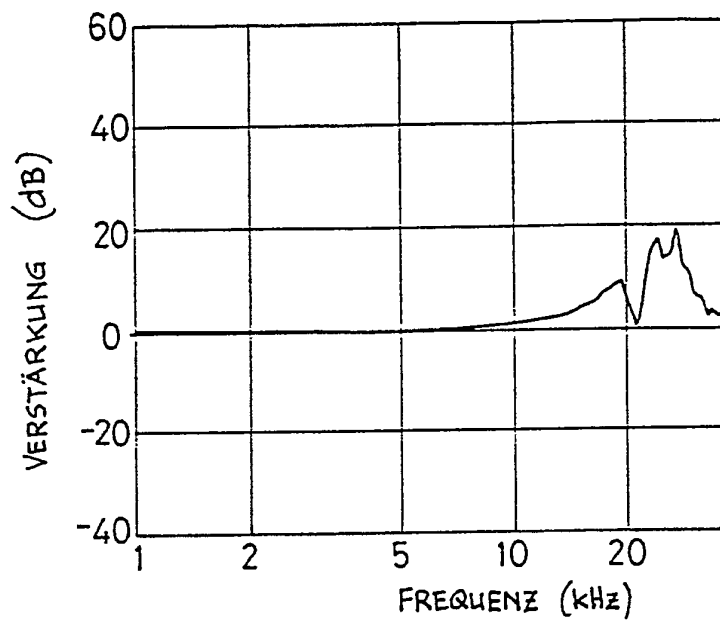


FIG.10(b)

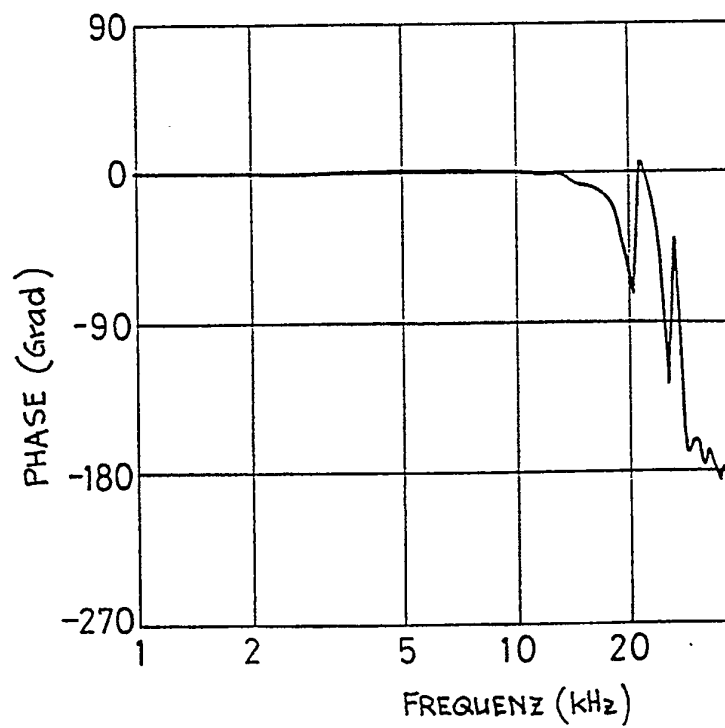


FIG. 11(a)

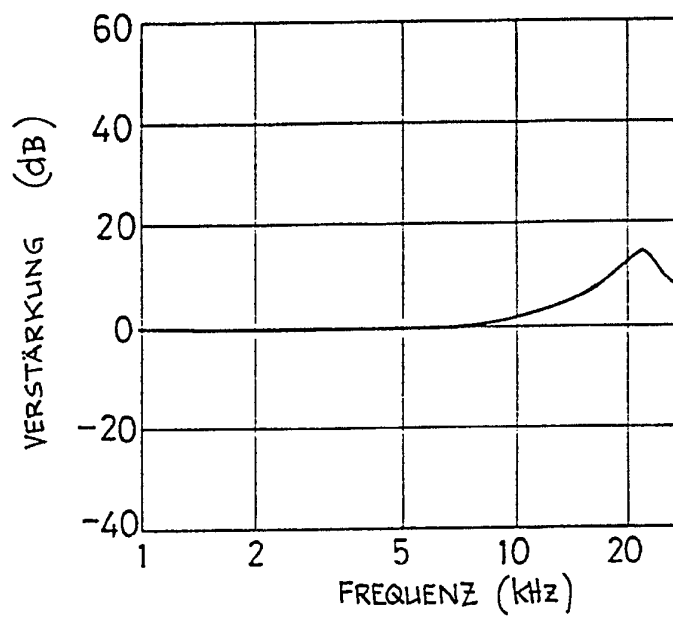


FIG. 11(b)

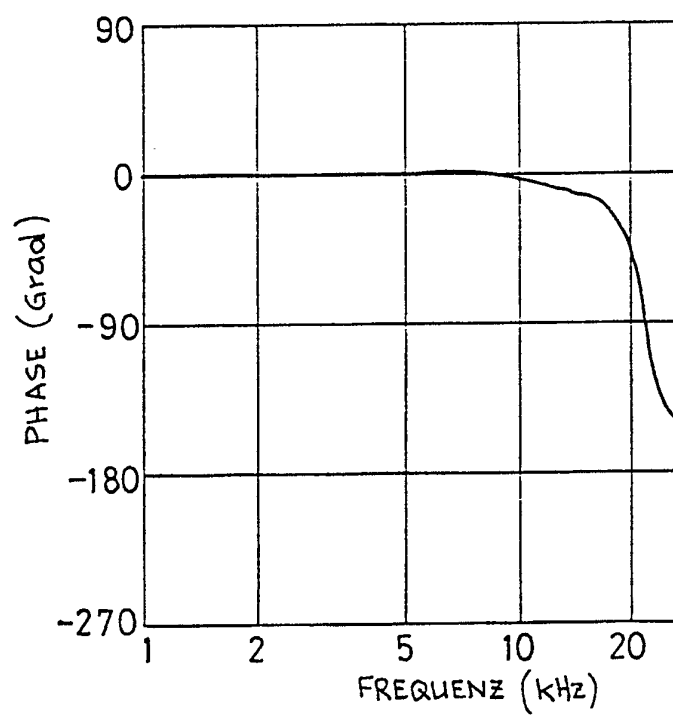


FIG.12(a)

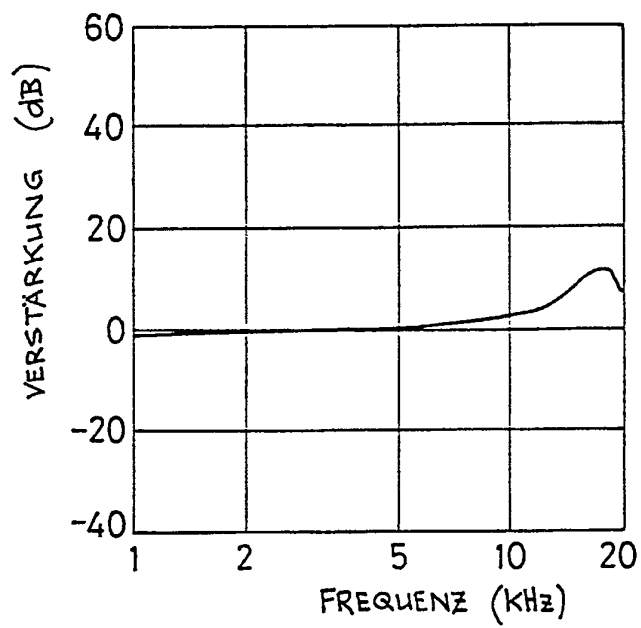


FIG.12(b)

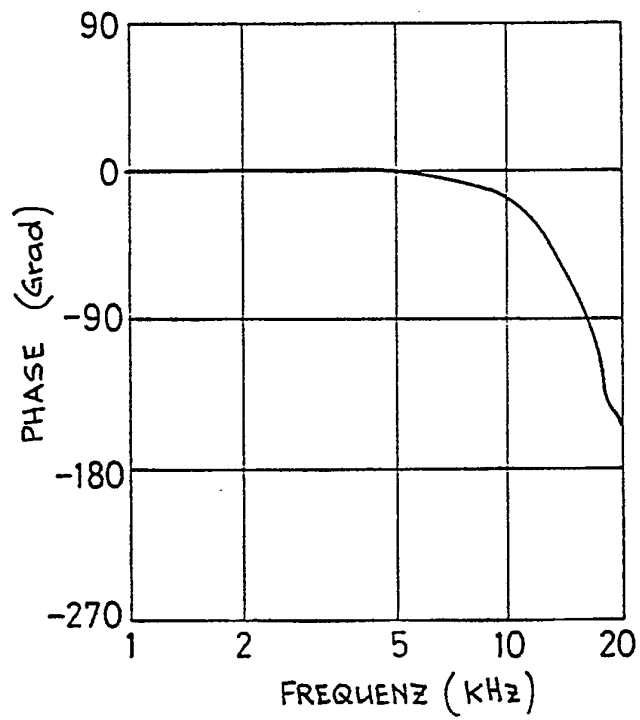


FIG.13(a)

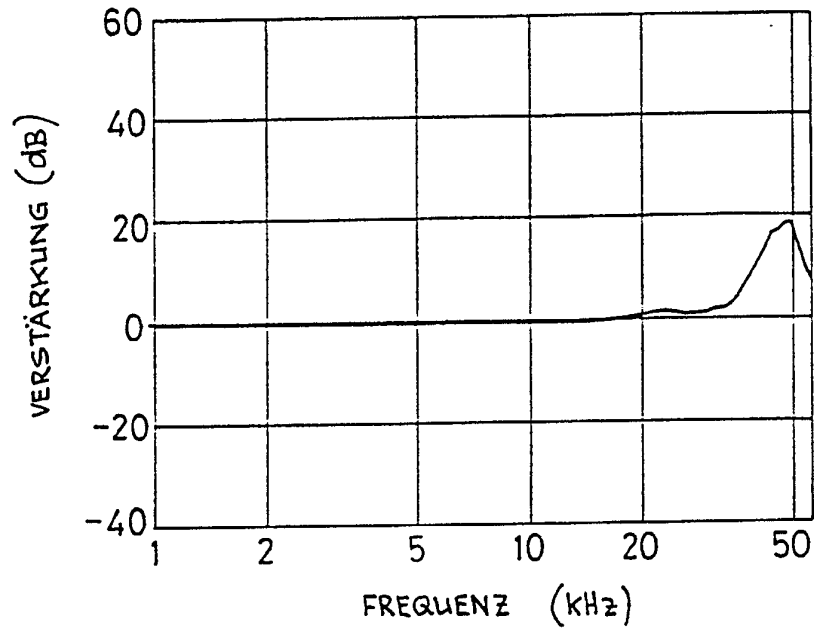


FIG.13(b)

