

19



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



11 Veröffentlichungsnummer: **0 473 095 A2**

12

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

21 Anmeldenummer: **91114279.2**

51 Int. Cl.⁵: **G10K 11/16**

22 Anmeldetag: **26.08.91**

30 Priorität: **30.08.90 DE 4027511**

43 Veröffentlichungstag der Anmeldung:
04.03.92 Patentblatt 92/10

84 Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH FR GB IT LI NL SE

71 Anmelder: **Mechel, Fridolin Peter, Prof. Dr.**
Landhausstrasse 12
W-7043 Grafenau 1(DE)

72 Erfinder: **Mechel, Fridolin Peter, Prof. Dr.**
Landhausstrasse 12
W-7043 Grafenau 1(DE)

74 Vertreter: **May, Hans Ulrich, Dr.**
Patentanwalt Dr. H.U. May Thierschstrasse
27
W-8000 München 22(DE)

54 **Hybrider Schalldämpfer.**

57 Die Erfindung betrifft einen hybriden Schalldämpfer, bei dem eine passive Absorberauskleidung mit einem aktiven elektroakustischen System derart kombiniert wird, daß die Schalldämpfung verstärkt wird, indem das aktive Subsystem auf die passive Absorberauskleidung einwirkt, um eine optimierte kanalseitige akustische Impedanz und dadurch eine bessere Schalldämpfung in einem breiten Frequenzbereich, besonders bei tiefen Frequenzen, zu erhalten.

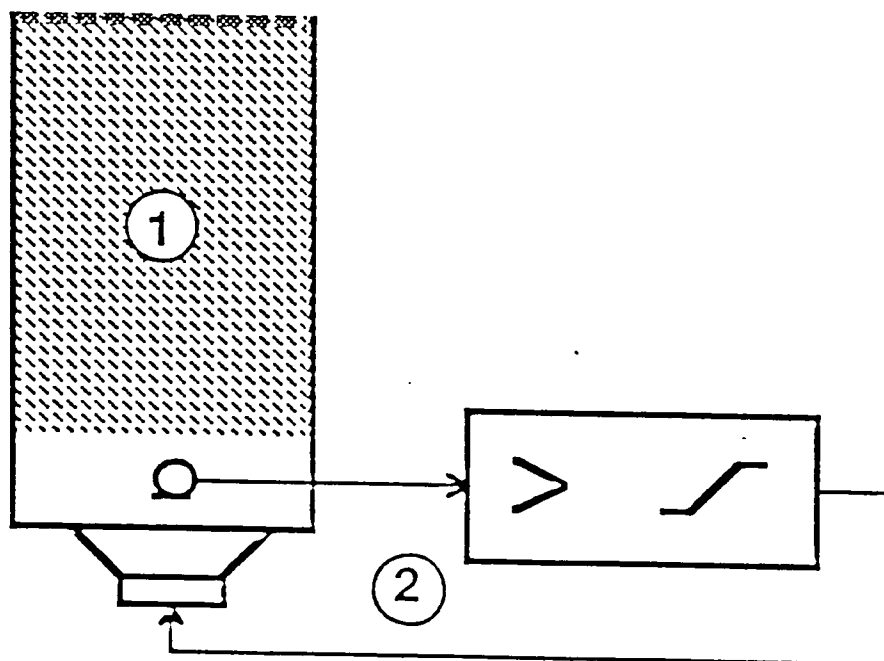


Abb. 4

EP 0 473 095 A2

1. Gebiet der Technik

Schalldämpfer werden überwiegend mit "passiven" Schallabsorbern ausgekleidet. Die Wechselwirkung der Absorberauskleidung mit dem Schallfeld im Schalldämpferkanal erfolgt im wesentlichen durch die
 5 akustische Oberflächen-Impedanz der Absorberauskleidung. Es gibt eine sogenannte optimale Oberflächen-Impedanz, die durch den Windungspunkt der sogenannten Absorberfunktion zwischen der ersten und der zweiten Schalldämpfermode eindeutig beschrieben ist. Realisierungsbemühungen in der Fachliteratur haben gezeigt, daß es grundsätzlich nicht möglich ist, mit rein passiven Absorberelementen diese Windungspunkt-Impedanz über einen größeren Frequenzbereich einzuhalten.

10 Bei einer anderen Technik, dem sogenannten "aktiven" Schallschutz, wird dem zu reduzierenden Lärm durch ein elektroakustisches System eine durch dieses System erzeugte Schallwelle derart überlagert, daß es in Schallausbreitungsrichtung zu einer auslöschenden Interferenz kommt (Methode des Anti-Schalls).

2. Gliederung

15 Nachfolgend werden zunächst die Fachbegriffe des Hauptanspruchs kurz erläutert, dann wird auf den Stand der Technik eingegangen, aus welchem die Aufgabenstellung der Erfindung hergeleitet wird. Des weiteren wird der Erfindungsgedanke formuliert und die Schritte zu seiner Realisierung werden beispielhaft behandelt. Dann wird der technische Fortschritt der Erfindung dargetan, und schließlich werden die
 20 Ansprüche der Erfindung aufgezählt.

Wo es zweckdienlich ist, werden mathematische Formeln benutzt als knappste und präziseste Darstellungsart physikalisch-technischer Zusammenhänge. Des weiteren dienen beispielhafte Schemazeichnungen der Erläuterung des Erfindungsgedankens und seiner Realisierung.

3. Begriffserläuterungen

25 Die Begriffserläuterungen sollen helfen, die Erfindung zu beschreiben und den technischen Fortschritt derselben zu begründen. Für eine vollständigere Darstellung der Akustik von Schalldämpfern wird auf die Literaturstelle [1] verwiesen.

Schalldämpfer:

Schalldämpfer dienen dazu, den Schalldurchgang durch Öffnungen zu verringern. In den meisten Anwendungen sind diese Öffnungen die lichten Querschnitte von Kanälen. Schalldämpfer - und somit auch
 35 der erfindungsgemäße Schalldämpfer - werden aber auch angewendet zur Verringerung des Schalldurchgangs durch Fugen (beispielsweise Türfugen) und durch Öffnungen für einen Material- oder für Personen-Durchgang (beispielsweise in Schallschutzkapseln von Maschinen und in Schallschutzkabinen). Die Öffnungen werden im Folgenden zusammenfassend "Kanäle" genannt.

Der erfindungsgemäße hybride Schallabsorber muß in seinen Kenndaten auf die Form des lichten
 40 Querschnitts des Schalldämpfer-Kanals angepaßt werden. Der Erfindungsgedanke wird hier beispielhaft für rechteckige Querschnitte entwickelt, wie in *Abbildung 1* dargestellt, ist aber nicht auf diese Form beschränkt. Die Erfindung läßt sich auch für andere Querschnittsformen anwenden, beispielsweise bei runden oder ringförmigen Kanälen.

Absorberauskleidung:

Schalldämpfer mit schallabsorbierender Auskleidung wirken prinzipiell dadurch schalldämpfend, daß auf dem ganzen Umfang oder auf einem Teil des Umfangs des lichten Kanalquerschnitts eine Absorberauskleidung angebracht ist, welche (meist nur in Teilen, beispielsweise die in porösen Materialien eingeschlossene
 50 Luft) durch die Schallwelle zu Schwingungen angeregt wird und dadurch mit ihr in Wechselwirkung tritt, so daß die Schallwelle bei ihrer Ausbreitung durch den Kanal gedämpft wird. Um die Wechselwirkung zu verstärken, wird der lichte Querschnitt des Kanals häufig durch schallabsorbierende Kulissen unterteilt. Ein solcher Kulissen-Schalldämpfer ist in *Abbildung 2* gezeigt. Der Erfindungsgedanke ist auch auf solche Formen der Absorberauskleidung anwendbar. Es wird dann jeder Kulissenspalt wie ein Schalldämpfer nach
 55 *Abbildung 1* behandelt.

Schallabsorber heißen "passiv", wenn das Mitschwingen der Absorberauskleidung durch die Schallwelle allein über mechanische (akustische) Wechselwirkungen hervorgerufen wird. Die Stärke und die Phase des Mitschwingens wird dann durch die Anordnung, die Abmessungen und die Materialeigenschaften der

Absorberauskleidung festgelegt. Die Auswahl der Komponenten des passiven Absorbers im erfindungsgemäßen Schalldämpfer wird durch den Erfindungsgedanken nicht eingeengt. Diese können beispielsweise sein: poröse Schallabsorber aus Faserstoffen (Mineralfasern, Metallfasern, Kunststofffasern, organische Fasern, offenzellige Schäume, porös gesinterte Werkstoffe etc.), biegeelastische Platten, Folien und Membranen, Lochbleche, Gewebe, Vliese etc. Diese Komponenten des passiven Absorbers können sich entweder in unmittelbarer Berührung miteinander oder in einem gegenseitigen Abstand voneinander befinden. Wegen einer vollständigeren Beschreibung solcher Absorberkomponenten und ihrer akustischen Eigenschaften wird auf die Literaturstelle [2] verwiesen.

10 Aktives Subsystem:

Das erfindungsgemäße aktive Subsystem besteht aus einem oder mehreren Schallaufnehmern, einem oder mehreren Signalformern und einem oder mehreren Schallgebern (meist: Lautsprecher). Die Schallaufnehmer sind meist Mikrofone, können aber auch Körperschallaufnehmer sein. Die Signalformer für das Ausgangssignal der Schallaufnehmer sind je nach Aufgabenstellung Kombinationen von Verstärkern, Frequenzfiltern und sonstigen an sich bekannten elektronischen Komponenten. Der Schallgeber wird durch die elektrische Ausgangsgröße des Signalformers nach dem Erfindungsgedanken derart in Schwingung versetzt, daß seine schwingende Oberfläche (zum Beispiel eine Lautsprecher-Membrane) eine erfindungsgemäße akustische Impedanz annimmt.

Die elektronischen Signalformer können wiederum aus passiven und aus aktiven elektronischen (nach dem in der Elektronik üblichen Sprachgebrauch) Komponenten bestehen; diese können an sich bekannte "analoge" oder "digitale" Funktionseinheiten sein.

Eine Schemazeichnung des aktiven Subsystems mit dem Schallaufnehmer (1), dem Signalformer (2) und dem Schallgeber (3) ist in *Abbildung 3* gezeigt.

25 Einwirkung auf den passiven Absorber:

In einer bevorzugten Ausführungsform des Erfindungsgedankens ist der Lautsprecher des aktiven Subsystems auf der dem Kanal abgewandten Seite der passiven Absorberschicht angeordnet und stellt für diese eine akustische Abschluß-Impedanz Z_b dar. Diese Anordnung, im Folgenden mit "Serienschaltung" bezeichnet, dient im Nachfolgenden als Beispiel für die Entwicklung des Erfindungsgedankens. Sie ist in *Abbildung 4* schematisch dargestellt. Sie stellt jedoch nicht die einzig mögliche Anordnung gemäß der Erfindung dar.

In einer anderen beispielhaften Ausführungsform besteht die kanalseitige Oberfläche der schallabsorbierenden Auskleidung aus einer Anordnung von "passiven" und von "aktiven" Teilflächen. Die passiven Teilflächen werden durch die Oberfläche von passiven Schallabsorbern gebildet, die aktiven Teilflächen werden entweder durch die Oberfläche der Lautsprecher oder durch Mündungen von Lautsprecherkammern gebildet, welche ihrerseits wieder ganz oder teilweise mit passiven Absorberkomponenten gefüllt sein können. Diese Anordnung wird weiterhin mit "Parallelschaltung" bezeichnet. Eine schematische Darstellung enthält die *Abbildung 5*.

Akustische Impedanz:

Die akustische Impedanz Z_w einer Oberfläche ist das Verhältnis des Schalldrucks an dieser Oberfläche zu der Oberflächen-normalen Schallschnelle. Gelegentlich wird nachfolgend auch der Kehrwert der Impedanz, nämlich die (akustische) Admittanz $G_w = 1/Z_w$, benutzt.

Das Produkt $U = k_0 h \cdot Z_0 G_w$ aus der Wandadmittanz G_w der Absorberauskleidung mit der Frequenzvariablen $k_0 h$ aus $k_0 = 2\pi f/c_0$ mit der Frequenz f und der Schallgeschwindigkeit c_0 sowie aus der halben Weite h des (hier der Einfachheit der Beschreibung halber spaltförmig angenommenen) lichten Kanalquerschnitts und schließlich des Wellenwiderstandes Z_0 der Luft (c_0 und Z_0 sind Materialkonstanten der Luft oder des schallführenden Mediums im Kanal) ist die sogenannte "Absorberfunktion" U . Sie bestimmt im wesentlichen die Wirksamkeit einer bestimmten Absorberauskleidung in einem Schalldämpfer (Weiteres siehe unten und in [1]).

Zur Vereinfachung der Schreibweise wird im Folgenden angenommen, daß alle Impedanzen Z und alle Admittanzen G mit dem Wellenwiderstand Z_0 des schallführenden Mediums normiert sind. Das erfolgt durch die Ersetzungen $Z \rightarrow Z/Z_0$ und $G \rightarrow Z_0 \cdot G$.

Schalldämpfer-Moden:

Moden sind Grund-Schwingungsformen eines Schallfeldes. Sie haben folgende Eigenschaften:

- sie "passen" in die Berandungen des Schallfeldes, das heißt, sie erfüllen jede für sich die Randbedingungen,
- man kann durch Überlagerung von Moden jedes beliebige (auch komplizierte) Schallfeld innerhalb dieser Berandung synthetisieren,
- die durch ein solches Schallfeld transportierte Wirkleistung ist einfach die Summe der Schalleistungen der Moden (was bei einer Zerlegung des Schallfeldes in andere Komponenten als Moden nicht so einfach wäre).

Sei x die axiale Koordinate eines Kanals in Schallausbreitungs-Richtung und y eine Quer-Koordinate (im Spaltkanal senkrecht zur Absorberoberfläche), dann ist eine geeignete Darstellung des Schalldruckfeldes:

$$p(x,y) = e^{-\Gamma x} \cdot q(y) \quad (1)$$

Darin ist $\Gamma = \Gamma' + j \cdot \Gamma''$ die komplexe (Längs-) Ausbreitungskonstante und $q(y)$ ist eine geeignete Querverteilungs-Funktion, welche die Randbedingungen an der Oberfläche der Absorberauskleidung erfüllen muß.

Der Realteil Γ' von Γ ist die Dämpfung in Neper pro Längeneinheit. Gebräuchlich (und im Nachfolgenden benutzt) ist die Angabe der Dämpfung D_h durch den Schallpegel-Abfall in Dezi-Bel (dB) pro halber Spaltweite h . Diese ist:

$$D_h = 8,68 \cdot \Gamma' h \text{ [dB]} \quad (2)$$

Die Durchgangsdämpfung D_d eines Schalldämpfers der Länge L ist dann:

$$D_d = 8,68 \cdot (\Gamma' h) \cdot \frac{L}{h} = D_h \cdot \frac{L}{h} \text{ [dB]} \quad (3)$$

Die Längs-Ausbreitungskonstante Γ erhält man aus der Frequenzvariablen $k_0 h$ und der Hilfsgröße z aus der Formel:

$$\Gamma h = \sqrt{z^2 - (k_0 h)^2} \quad (4)$$

wobei die Hilfsgröße z eine Lösung der Bestimmungsgleichung

$$z \cdot \tan z = jU \quad (5)$$

ist mit der oben eingeführten (und aus den Absorberdaten bekannten) Absorberfunktion U .

Der hier skizzierte Rechenweg gilt für das gewählte Beispiel eines spaltförmigen Rechteckkanals mit symmetrischen Moden (gleichphasige Schwingung des Schallfeldes beiderseits der Symmetrieffläche des Spaltkanals). Der Fall antisymmetrischer Moden (gegenphasige Schwingung beiderseits der Symmetrieffläche) führt zu der Bestimmungsgleichung für z (siehe [1]):

$$z / \tan z = -jU \quad (6)$$

Für andere Querschnittsformen wird auf [1] verwiesen. Bei einem runden Kanalquerschnitt mit axialsymmetrischem Feld ist beispielsweise die Bestimmungsgleichung:

$$z \cdot \frac{J_1(z)}{J_0(z)} = jU \quad (6a)$$

mit den Besselfunktionen J_0 und J_1 nullter beziehungsweise erster Ordnung. Die Werte im Windungspunkt zwischen der ersten und der zweiten Mode sind hierbei: $U_{wp} = 2,98 + j \cdot 1,98$ und $z_{wp} = 2,2285 + j \cdot 2,358$.

Die Funktion $\tan z$ ist periodisch im Realteil z' des komplexen Arguments $z = z' + j \cdot z''$. Ihr Wertevorrat wiederholt sich entlang z' in Abständen von π . Das führt dazu, daß die Bestimmungsgleichungen (5) und (6) (unendlich) viele Lösungen z haben. Jede dieser Lösungen stellt dann eine Schalldämpfer-Mode dar. Man erkennt aus Gl.(4), daß die verschiedenen modalen Lösungen für z zu unterschiedlichen modalen Dämpfungen führen. Die Modendämpfung wächst im allgemeinen mit der Ordnungszahl m der Moden an, das heißt mit der Laufzahl des Periodenstreifens entlang z' , aus welchem die Lösung stammt.

Welche Schalldämpfer-Mode vorherrscht, welche Modendämpfung also zu benutzen ist, hängt nicht nur von der Bauform und der Dimensionierung des Schalldämpfers ab, sondern überwiegend von der Querverteilung des auf den Schalldämpfer auftreffenden Schallfeldes, demnach von der Schallquelle (Gebläse, Kompressor, Flamme etc.) und von den Störstellen (Ecken, Abzweigungen, Einbauten etc.) in dem Kanal vor dem Schalldämpfer. Eine durch den Gebrauch gerechtfertigte Regel ist deshalb, den Schalldämpfer für die niedrigst gedämpfte Mode auszulegen. Dies wurde schon in den frühen Arbeiten [3] und [4] empfohlen. Diese Regel bestätigt sich deshalb, weil die niedrigst gedämpfte Mode sich unter den beiden ersten Moden befindet und weil höhere Moden schwer anregbar sind, also nur selten das Schallfeld dominieren. Sollten sie dennoch vorhanden sein, dann würden sie eine höhere Dämpfung als die Auslegungs-Dämpfung besitzen.

Windungspunkt zwischen Moden:

Trägt man für die Lösungen $z = z' + j \cdot z''$ der Bestimmungsgleichung Kurven mit jeweils konstantem Realteil z' und mit konstantem Imaginärteil z'' über der komplexen Ebene der (als bekannt vorausgesetzten) Absorberfunktion $U = U' + j \cdot U''$ auf, dann entstehen die Kurvennetze der *Abbildung 6* und *Abbildung 7*. Jede dieser Abbildungen deckt etwa einen der Periodenstreifen über z' , das heißt eine Mode, ab. Und zwar die *Abbildung 6* die erste Mode der Gl.(5) und *Abbildung 7* die nächst höhere Mode. Andere Darstellungsformen sind in [1], [3], [4] zu finden.

Am unteren Ende des Bereiches in diesen Abbildungen, in welchem die Kurvennetze (nahezu) rechteckig sind, erkennt man Punkte, um welche sich die Kurven "herumwinden". Dies sind die "Windungspunkte".

Wichtig im Zusammenhang mit der Erfindung ist der in [4] nachgewiesene Umstand, daß eine Mode in ihrem oberen Windungspunkt ihre höchste Dämpfung hat.

Weiterhin wichtig im Zusammenhang mit der Erfindung ist die Tatsache, daß benachbarte Moden diese Windungspunkte gemeinsam haben. Dort fallen die beiden Lösungen z benachbarter Moden zusammen. Wenn also die Absorberauskleidung eines Schalldämpfers eine Absorberfunktion mit dem Wert $U = U_{wp}$ im Windungspunkt der beiden ersten Moden hat, dann gibt es keine Schwingungsform in diesem Schalldämpfer mit einer geringeren Dämpfung, da ja die geringst gedämpfte Mode sich unter den beiden ersten Moden befindet.

Annäherung an den Windungspunkt:

In [4] ist beschrieben, wie man die Werte der Absorberfunktion U_{wp} am Windungspunkt und die zugehörigen Lösungen z_{wp} ermittelt und es sind dort Zahlenwerte angegeben. Für den Windungspunkt zwischen den beiden niedrigsten Moden gilt für ein symmetrisches Schallfeld im rechteckigen Spaltkanal: $U_{wp} = 2,05998 + j \cdot 1,65061$ und $z_{wp} = 2,1062 + j \cdot 1,12536$.

Die *Abbildung 8* zeigt die Frequenzkurve der Dämpfung D_h der niedrigst gedämpften Mode in einem rechteckigen Spaltkanal, wenn sich die Absorberfunktion U der Absorberauskleidung bei allen Frequenzen im Windungspunkt U_{wp} befindet. Man erhält diese Kurve aus den Gln.(4) und (2), wenn man in der Gl.(4) $z = z_{wp}$ einsetzt. Die Abszisse dieser (und aller nachfolgender) Darstellung der Dämpfung D_h ist das Produkt $f \cdot h$ in $[Hz \cdot m]$, weil sich so Schalldämpfer zusammenfassen lassen, welche gewisse "Ähnlichkeitsgesetze" erfüllen. Man beachte die logarithmische Auftragung der Dämpfung.

Um sich die Aussage der *Abbildung 8* zu verdeutlichen, denke man an einen Schalldämpfer mit einer Spaltweite $H = 2h = 0,2$ m, also $h = 0,1$ m. Dies ist eine häufig benutzte Spaltweite bei Schalldämpfern für technische Anlagen. Dann würde ein Schalldämpfer nach *Abbildung 8* mit einer Länge $L = 1$ m bei tiefen Frequenzen eine Dämpfung von $D_d = 190$ dB besitzen, ein fürwahr außerordentlich hoher Wert!

Diese extrem hohe Dämpfung ist technisch kaum voll ausnutzbar, weil dann andere Schall-Übertragungsmechanismen, wie Körperschall-Ausbreitung im Schalldämpfer-Gehäuse, die effektive Schallpegel-Minderung durch den Schalldämpfer begrenzen würden. Deshalb braucht man bei einem Schalldämpfer nach dieser Erfindung den Wert U_{wp} der Absorberfunktion nicht exakt einzustellen; es genügt eine Annäherung an diesen Wert, um deutliche Verbesserungen der Schalldämpfung gegenüber konventionellen

Schalldämpfern zu erzielen.

Gewünschter Frequenzbereich:

Es ist nicht besonders schwierig, mit rein passiven Absorberauskleidungen den Wert U_{wp} der Absorberfunktion in einzelnen Frequenzen anzunähern. In [1, Bild 19.13] sind die Daten für eine einfache Absorberschicht aus Mineralfasern angegeben ($d/h = 1$; $\alpha d/Z_0 = 0,4$) , deren Absorberfunktion den Windungspunkt sogar an zwei Frequenzen durchläuft. Die zugehörige Dämpfungskurve (allerdings mit heutigen Absorberkennwerte der Mineralfasern statt den in [1] verwendeten Kennwerten; deshalb lediglich eine Annäherung an die optimale Dämpfungskurve) zeigt die **Abbildung 9** . Typisch für solche rein passiven Realisierungen der optimalen Wandimpedanz der Absorberauskleidung ist, daß der hohe Dämpfungswert nur in schmalen Resonanzspitzen erreicht wird und bei anderen Frequenzen mit tiefen Dämpfungs-Einbrüchen erkauft wird.

Dies gilt auch für die Bemühungen der Realisierung mit passiven Absorbern in der Literaturstelle [6], welche allein dieser Aufgabe gewidmet war. Auch die Erfolge der Realisierungsbemühungen in [7] sind nicht wesentlich verschieden davon.

Wie bereits in [4] dargelegt wurde, liegt der Grund für die Mißerfolge einer Realisierung von U_{wp} über einen breiten Frequenzbereich darin, daß kein passives Bauteil bekannt ist, welches die Reaktanz einer Feder mit dem Frequenzgang einer trägen Masse verbindet. Die Probleme bei der rein passiven breitbandigen Realisierung der optimalen Impedanz der Absorberauskleidung sind also grundsätzlicher Art.

Es ist der entscheidende Vorteil der Erfindung gegenüber Schalldämpfern mit rein passiven Absorberauskleidungen, daß die optimale Impedanz über einen breiten Frequenzbereich gehalten werden kann.

Sicherlich wäre es im Prinzip wünschenswert, die Optimal-Impedanz über den gesamten Frequenzbereich einzustellen, also die Dämpfungskurve von **Abbildung 8** zu realisieren. Dies würde jedoch den Realisierungsaufwand beträchtlich erhöhen. Es ist ein weiterer Vorteil der Erfindung, daß der Frequenzbereich und die Höhe der verbesserten Schalldämpfung eingestellt werden können, wodurch sich Kompromisse zwischen Aufwand, technischen Nebenbedingungen (wie Platzbedarf, Druckverlust etc.) mit der anzustrebenden Schalldämpfung einstellen lassen.

Den meisten technischen Anwendungen von Schalldämpfern ist aber gemeinsam, daß eine hohe Dämpfung bei tiefen Frequenzen (ca. 30 Hz bis ca. 250 Hz) verlangt wird. Das liegt an dem grundsätzlichen Verlauf der Frequenzspektren des Lärms von Strömungserzeugern mit einem Anstieg zu tiefen Frequenzen hin. Fast ebenso grundsätzlich sind die Probleme bei der Erzielung hoher, breitbandiger Schalldämpfungswerte bei tiefen Frequenzen mit rein passiven Absorberauskleidungen. Das liegt an dem Grundsatz bei passiven akustischen Bauteilen, daß alle Abmessungen in Einheiten der Schallwellenlänge gemessen werden, welche zu tiefen Frequenzen hin anwächst. Demzufolge haben konventionelle Schalldämpfer für tiefe Frequenzen ein großes Bauvolumen, die Absorberdicken d müssen groß werden, was dann zu einem Anstieg der Strömungs-Druckverluste führt. Weiter unten wird an einem Beispiel gezeigt, daß die dadurch verursachten Betriebskosten eines Schalldämpfers seinen Anschaffungswert bei weitem übersteigen können.

Aus diesem Grund wird ein besonderes Augenmerk auf die Dämpfung bei tiefen Frequenzen gelegt.

4. Stand der Technik

Eine Darstellung des Standes der Technik muß auf zwei Techniken eingehen: die Technik des "passiven" Schallschutzes mit rein passiven Bauteilen und die Technik des "aktiven" Schallschutzes mit allein elektroakustischen, "aktiven" Bauteilen.

Die Probleme bei der Realisierung hoher Schalldämpfungen mit rein passiven Absorberauskleidungen - insbesondere bei tiefen Frequenzen - wurden teilweise oben bei den Begriffserläuterungen erwähnt. Den Stand der konventionellen Technik bei einer guten Auslegung eines passiven Breitbandschalldämpfers beschreibt [1, Bild 19.21], welches hier als **Abbildung 10** mit den hier benutzten Bezeichnungen wiederholt wird. Eine ähnliche Kennzeichnung enthält auch [8, Bild 12/10] und [9, Bild 6.138], wobei an letzterer Literaturstelle die Obergrenze für technische Realisierungen nicht auf $D_h = 3$ dB gelegt wird, sondern auf $D_h = 1.5$ dB abgesenkt ist. Auch die Neubearbeitung der VDI-Richtlinie über Schalldämpfer [10] wiederholt diese Angaben als den Stand der Technik für gute Breitband-Schalldämpfer.

Die hier vorgestellte Erfindung braucht sich mit passiven Schalldämpfern eigentlich nicht auseinanderzusetzen, da sie weder nach der Lösungskonzeption noch nach der erzielten Dämpfung vergleichbar sind. Lediglich um den derzeitigen Stand auf diesem Gebiet zu illustrieren, sei eine moderne Entwicklung kurz vorgestellt. In [11] wird ein Absorberelement aus sogenannten "Membranabsorbern" für Schalldämpfer beschrieben, welches durch die Kombination mehrfacher Resonanzsysteme in mühsamer Probierarbeit so

abgestimmt wurde, daß es über eine gewisse Frequenzbandbreite (meist ca. 1,5 Oktaven) eine möglichst hohe Dämpfung bei möglichst geringer Bautiefe erzielen soll. Die *Abbildung 11* zeigt Dämpfungskurven verschiedener Typen dieses Absorberelementes, welche auf verschiedene Frequenzbereiche abgestimmt sind. Die oben angegebenen technisch realisierbaren Dämpfungen von $D_h = 3$ dB werden kaum überschrit-

ten. Es bleibt im wesentlichen der Vorteil der kleineren Bautiefe. Dafür liegt aber der Preis solcher Elemente bei dem drei- bis fünffachen des Preises von konventionellen Dämpferkulissen mit ansonsten vergleichbaren Leistungen.

Mit dem gleichen Ziel, nämlich einer Verringerung der Bautiefe der Kulissenelemente befaßt sich auch die Offenlegungsschrift DE 34 25 450 Al [20]. Diese löst ein besonderes Problem bei Kulissen-Schalldämpfern, das dadurch entsteht, daß zwar die gesamte Breite des Kanals, in dem die Kulissen eingebaut werden (siehe Abb. 2 der vorliegenden Beschreibung), sich stetig ändert, weil man diese Kanalbreite in den vorhandenen Platz einpassen muß, daß aber andererseits die Baubreite einer gewissen Kulissen-Anordnung sich nur sprunghaft um die Breite $D + H$ bei Hinzunahme oder Weglassung einer weiteren Kulissee ändern kann. Die genannte Schrift weist darauf hin, daß man mit einer Kulissen-Anordnung aus gleich-dicken Kulissen mit gleich-breiten Kulissenspalten in dem Zwischenbereich eines solchen Sprungs der Kanal breite entweder Schalldämpfung verliert, wenn man die Kulissenspalte mit wachsender Kanalbreite proportional vergrößert, oder den Druckverlust des Schalldämpfers unzulässig erhöht, wenn man mit wachsender Kanalbreite eine weitere Kulissee hinzunimmt und die Kulissenspalte derart verkleinert, daß die hinzugenommene Kulissee Platz findet. Nach dieser Druckschrift soll das Problem dadurch gelöst werden, daß man Kulissen mit unterschiedlicher Dicke verwendet. Durch geeignete Kombination derselben kann man leichter eine vorgegebene Gesamtbreite der Kulissen-Anordnung realisieren, ohne daß das für die Dämpfung und den Druckverlust maßgebliche Verhältnis D/H geändert werden müßte. Geeignete Kombinationsmöglichkeiten werden in dieser Schrift in ausführlichen Listen angegeben.

Die genannte Offenlegungsschrift hat mit der vorliegenden Erfindung nur das allgemeine Ziel gemeinsam, bei Kulissen-Schalldämpfern die Dämpfung zu erhöhen und den Druckverlust zu erniedrigen. Die Art des Absorber-Aufbaus der verwendeten Kulissen wird - entsprechend der dortigen Aufgabenstellung - völlig offengelassen; demzufolge fehlt jeglicher Hinweis auf die zu realisierende Optimal-Impedanz der Kulissenoberflächen, die die Grundlage eines erfindungsgemäßen Schalldämpfers bildet. Die genannte Schrift enthält auch keine Erwähnung eines elektroakustischen Systems zur Erzielung einer solchen Optimal-Impedanz. Somit fehlt dort jeglicher Hinweis auf die Grundkonzeption für den erfindungsgemäßen Schalldämpfer und auch auf eine entscheidende Grundkomponente desselben, nämlich auf das aktive Subsystem.

Wichtiger ist der Vergleich mit den sogenannten "aktiven" Schalldämpfern. Diese Entwicklung begann mit den Patentschriften [12]. Nach längere Zwischenzeit setzte mit Beginn der 70er Jahre eine lebhafte Forschungstätigkeit über die Methoden der "aktiven" Lärmbekämpfung ein. In [13] ist eine kurz gefaßte Übersicht gegeben. Eine Literaturzusammenstellung von 1988, [14], enthält 1708 einschlägige Zitate von Publikationen auf diesem Gebiet. Diese lebhafte Forschungstätigkeit wurde ausgelöst durch die natürlichen Beschränkungen passiver akustische Bauteile, welche mit dem Schallfeld nur nach den vorgegebenen akustischen Gesetzen für ihre Impedanzen und Übertragungsfunktionen in Wechselwirkung treten können. Ein weiterer Anstoß für die lebhaften Bemühungen um die "aktive" Lärmbekämpfung war die technische Entwicklung der elektronischen Komponenten, welche es erlaubt, praktisch jede mathematisch formulierbare Impedanz oder Übertragungsfunktion mit vertretbarem Kostenaufwand elektronisch zu realisieren.

Das oft auch mit "Lärmbekämpfung durch Antischall" bezeichnete Prinzip der aktiven Schalldämpfung ist in der *Abbildung 12* dargestellt. Von links fällt die Schallwelle einer Lärmquelle in einem Kanal auf ein Mikrofon (1) ein. Dessen Ausgangssignal wird über einen Signalverarbeiter (2) (mit Verstärkung, Filterung, Laufzeitverschiebung etc.) auf Lautsprecher (3) gegeben, welche im wesentlichen Schall abstrahlen, der mit dem Schall der Lärmquelle möglichst auslöschend interferieren soll. Tatsächlich ist diese interferierende Auslöschung wirksam nur in einer Richtung (Vorwärtsrichtung) möglich; in Rückwärtsrichtung wird bei den meisten aktiven Systemen der Schall eher verstärkt. In einer Weiterentwicklung wird nach *Abbildung 13* ein Mikrofon (4) auch hinter den Lautsprechern angeordnet, dessen Ausgangssignal dazu dient über einen Regler (5) die Parameter des Signalverarbeiters (2) adaptiv zu verbessern in Richtung auf eine Minimierung des Schalldrucks am Ort des Mikrofons (4).

Die meisten Untersuchungen der erwähnten Forschung beschäftigen sich mit der Entwicklung von Steuer- und Regel-Algorithmen für die Signalverarbeitung und für die adaptive Nachbesserung. Ein weiterer Teil befaßt sich mit der Entwicklung geeigneter Lautsprecher und ihrer Anordnung.

So bestechend einfach das Prinzip der aktiven Lärmbekämpfung zunächst erscheint, so deutlich zeichnen sich einige prinzipielle und technische Schwierigkeiten ab. Zunächst kann man sich leicht klar machen, mit welcher Genauigkeit die Schallfeldkompensation über den ganzen Kanalquerschnitt funktionieren muß. Um eine Durchgangsdämpfung D_d von 40 dB zu erzielen (eine Forderung üblicher Größenordnung

im mittleren Frequenzbereich), darf der Restfehler der Schallfeldkompensation nur 10% auf einer Restfläche von 1% des Kanalquerschnitts betragen oder ein Restfehler von ca. 3% der Kompensation auf einer Teilfläche von 10%. Dies erklärt, warum Schalldämpfungen von 40 dB mit aktiven Systemen breitbandig nur unter Laborbedingungen (exakte Kanalquerschnitte, exakt ebene Schallwellen, keine Strömung) realisiert wurden, da die Lautsprecher für den Antischall an ihren Rändern nur schwer beherrschbare Schallfelder erzeugen. Ein weiteres prinzipielles Problem rührt daher, daß in den Schalldämpferkanälen Luftströmungen vorherrschen. Das aktive System kann aber zunächst nicht zwischen turbulenten Druckschwankungen der Strömung, welche keinen Schall abstrahlen und deshalb harmlos sind, und den zu verringernden Schalldruckschwankungen unterscheiden. Dies ist der Grund, warum die ursprünglich gehegten, Hoffnungen, mit den aktiven Systemen einen Schalldämpfer für tiefe Frequenzen (unter ca. 100 Hz) zu erhalten, nicht erfüllt werden konnten, da die turbulenten Druckschwankungen mit fallender Frequenz stärker werden. Ein technologisches Problem liegt darin, daß die meisten Strömungen in technischen Schalldämpfern heiße Gase und/oder chemisch aggressive Dämpfe und/oder Schmutz transportieren, da sowohl die Steuermikrofone als auch die Lautsprecher dem Schallfeld und damit der Strömung direkt ausgesetzt sind. Ein weiteres Lautsprecher-technisches Problem liegt darin, daß die Schallschnelle der Lautsprechermembranen etwa die gleiche Größe wie die Schallschnelle des Störschalls haben muß, daß aber der Schalldruck durch die angestrebte Kompensation nahezu Null wird. Der Lautsprecher arbeitet also auf ein Schallfeld mit niedriger Feldimpedanz. Demzufolge muß auch die mechanische Impedanz der Lautsprecher sehr niedrig sein; die Membranen müssen leicht und weich gelagert sein und müssen große Hübe machen (zumindest bei tiefen Frequenzen). Solche Lautsprecher sind nun wiederum nicht geeignet, einer turbulenten Strömung exponiert zu werden. Ein regeltechnisches Problem rührt daher, daß das Steuermikrofon (1) auf der Seite der Lärmquelle nicht nur das zu unterdrückende Schallfeld aufnimmt, sondern auch den von den Lautsprechern nach hinten abgestrahlten Antischall. Tatsächlich wurde ein großer Anteil der Forschung darauf verwendet, mit Hilfe geeigneter Steueralgorithmen aus dem überlagerten Signal wieder das Störsignal herauszupräparieren. Ein weiteres grundsätzliches Problem bei der technischen Anwendung der aktiven Schalldämpfer liegt darin, daß sowohl durch Steuermikrofone (1) und Regelmikrofone (4) das Schallfeld nur in einigen wenigen Punkten abgetastet werden kann und auch das Anti-Schallfeld durch die Lautsprecheranordnung nur in einigen Punkten genau vorgegeben werden kann. Dies kann funktionieren, solange das Störschallfeld eine konstante Querverteilung hat. Gerade diese Querverteilung verändert sich aber bei technischen Schallquellen und bei den großen Querabmessungen der Kanäle laufend. Dies alles mag der Grund sein, warum aktive Schalldämpfersysteme über das Laborstadium kaum hinausgekommen sind; zumindest haben sie trotz der intensiven Forschungstätigkeit noch keine technische Bedeutung erlangt. Bei einer technischen Anwendung käme außerdem noch erschwerend hinzu, daß bei einem Ausfall des aktiven Systems praktisch überhaupt keine Schalldämpfung mehr vorhanden wäre.

Ein Verfahren und eine Vorrichtung zur aktiven Schalldämpfung sind in der Offenlegungsschrift DE 27 12 534 A1 [21] beschrieben. Dort wird auch das als aktive Dämpfung bekannte Prinzip definiert, das darin besteht, "daß der Energiegehalt (einer) Welle dadurch reduziert werden kann, daß man die Primärwelle mit einer speziell erzeugten Sekundärwelle in einer derartigen Weise kombiniert, daß die Verdünnungen der Sekundärwelle mit den Verdichtungen der Primärwelle zusammenfallen und umgekehrt". Die genannte Offenlegungsschrift betont, daß die Sekundärwelle gegenüber der von ihr aufzuhebenden Primärwelle genau erzeugt werden muß. Sie beschreibt die Schwierigkeiten bei der genauen Erzeugung der Sekundärwelle nach dem Prinzip der aktiven Dämpfung und befaßt sich ausschließlich mit Verfahren und Vorrichtungen zur Gewinnung des Steuersignals für die Schallquelle der Sekundärwelle. Der in der genannten Offenlegungsschrift verwendete Prinzipaufbau ist in den Abbildungen 12 und 13 der vorliegenden Beschreibung gezeigt. Als eine der Schwierigkeiten wird in der genannten Schrift die Rückwirkung des Schalls von der Sekundärquelle ((3) in den Abbildungen) auf das Mikrofon für die Primärwelle ((1) in den genannten Abbildungen) genannt, und die bekannte Lehre befaßt sich demgemäß überwiegend mit dem Problem, diese Rückwirkung zu vermeiden, indem von dem Ausgangssignal dieses Mikrofons eine geeignet gebildete Wechselspannung abgezogen wird.

Es ist einer der Haupt-Vorzüge der vorliegenden Erfindung, daß dieses Problem bei dem erfindungsgemäßen Schalldämpfer nicht auftritt, da an dem Steuermikrofon des erfindungsgemäßen aktiven Subsystems die Schallwelle des Lautsprechers nicht subtrahiert werden muß, so daß auch die in der genannten Schrift beschriebenen komplizierten Vorverfahren und Vorrichtungen zur Vermeidung der Rückwirkung der Sekundärquelle auf das Steuermikrofon nicht benötigt werden und die bekannte Lehre die Erfindung nicht nahelegen kann. In der genannten Schrift wird auch ein Zweites Mikrofon ((4) in Abbildung 13 der vorliegenden Beschreibung) benutzt, um die Signalaufbereitung von dem ersten Steuermikrofon ((1) in Abbildung 13) zu verbessern. Diese sogenannte Rückwärts-Regelung ist an sich allgemeiner Stand der Regeltechnik und ist an sich nicht Gegenstand des erfindungsgemäßen Schalldämpfers. Wichtig ist bei

allen regeltechnischen Aufgaben vielmehr, wie das Signal der Rückwärts-Regelung aufbereitet und in den Regelkreis eingeführt wird. Die Realisierung der Rückwärts-Regelung ist bei der genannten Offenlegungsschrift einerseits und bei dem erfindungsgemäßen Schalldämpfer andererseits entsprechend den grundsätzlich verschiedenen Aufgabestellungen vollständig verschieden voneinander. Die Verwendung einer Rückwärts-Regelung auch in der genannten Offenlegungsschrift nimmt daher den Erfindungsgedanken nicht vorweg.

Wie diese Offenlegungsschrift bestätigt, beruht das Prinzip der aktiven Schalldämpfung und beruhen aber auch die Probleme dieser aktiven Schalldämpfung darauf, daß die auslöschende Sekundärwelle "genau erzeugt werden" muß. Eben diese Notwendigkeit wird bei dem erfindungsgemäßen Schalldämpfer vermieden durch die Verwendung eines passiven Subsystems, welches bereits für sich eine gewisse Schalldämpfung erzeugt und welches durch ein erfindungsgemäßes aktives Subsystem so beeinflusst wird, daß diese Schalldämpfung verbessert wird. Diese Offenlegungsschrift enthält keinerlei Hinweis auf einen passiven Schallabsorber. Bereits daraus wird deutlich, daß sie den vorliegenden Erfindungsgedanken nicht nahelegen kann.

Wie unten dargelegt wird, werden die meisten dieser Probleme bei der vorgelegten Erfindung vom Ansatz her vermieden.

Schließlich soll zum Stand der Technik noch auf die Literaturstelle [15] eingegangen werden, in welcher ein Schalldämpfer beschrieben wird, der dort "hybrid" genannt wird. Tatsächlich handelt es sich dabei um eine Hintereinander-Anordnung in Schallausbreitungsrichtung eines rein passiven Schalldämpfers und eines aktiven Schalldämpfers. Beide Schalldämpfer werden in ihren Frequenzkurven lediglich so abgestimmt, daß sich für den Schalldurchgang durch beide Schalldämpfer zusammen eine günstige Frequenzkurve ergeben soll. Eine Wechselwirkung eines passiven Subsystems einer Absorberauskleidung mit einem aktiven Subsystem dieser Auskleidung im selben Schalldämpfer wie bei der vorgelegten Erfindung findet nicht statt. Während die Wirkung der beiden Schalldämpferabschnitte bei der genannten Literaturstelle additiv ist, erfolgt die Wirkung der beiden Subsysteme bei dem erfindungsgemäßen Schalldämpfer multiplikativ. Die Literaturstelle hat mit der vorgelegten Erfindung nur das Bemühen um eine Verbesserung der Schalldämpfung und das Wort "hybrid" gemein.

5. Aufgabenstellung und Erfindungsgedanke

Aufgabe der Erfindung ist somit, die Absorberauskleidung eines passiven Subsystems und ein elektroakustisches aktives Subsystem so zu kombinieren, daß beide im Zusammenwirken eine deutliche Verbesserung der Schalldämpfung gegenüber Dämpfern bekannter Bauart erbringen.

Zur Lösung dieser Aufgabe dient ein hybrider Schalldämpfer bestehend aus einer passiven Absorberauskleidung (passives Subsystem) und einem aktiven elektroakustischen System (aktives Subsystem), der dadurch gekennzeichnet ist, daß das elektroakustische aktive Subsystem derart auf den mit ihm kombinierten passiven Absorber einwirkt, daß in dem so gebildeten hybriden Absorber die akustische Impedanz der Kanal-seitigen Oberfläche der Absorberauskleidung eine Absorberfunktion U ergibt, welche in einem gewünschten Frequenzbereich den Wert der Absorberfunktion U_{wp} des Windungspunktes zwischen der ersten und der zweiten Schalldämpfer-Mode erreicht oder annähert (Hauptanspruch).

Vorteilhafte Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Erfindungsgemäß soll also die Absorberfunktion U über einen breiten Frequenzbereich, vornehmlich bei tiefen Frequenzen, dem Wert U_{wp} der Absorberfunktion im oberen Windungspunkt der niedrigst gedämpften Mode, d.h. zwischen der ersten und zweiten Dämpfermode, hinreichend nahekommen. "Hinreichend" soll dabei gemessen werden an einer deutlichen Verbesserung der Schalldämpfung gegenüber Dämpfern bekannter Bauart.

Die nachfolgenden Darlegungen sollen die Realisierungsschritte dieses Erfindungsgedankens beispielhaft erläutern. Es wird dabei deutlich werden, daß es verschiedene Realisierungsmöglichkeiten gibt. Darin und in der damit begründeten Möglichkeit zu kostengünstigen Lösungen wird ein Vorteil der Erfindung gesehen. Da der Erfindungsgedanke wegen der Flexibilität seiner Realisierung auch durch eine größere Zahl von Beispielen nicht vollständig ausgeschöpft werden kann, soll bei den Ausführungen mehr Wert darauf gelegt werden, die zielstrebige Realisierung in einzelnen Schritten darzulegen. Die dabei angeführten Beispiele sollen den Erfindungsumfang nicht begrenzen.

6. Realisierung des Erfindungsgedankens

6.1 Passives Subsystem

Die Realisierung des Erfindungsgedankens wird beispielhaft an einem rechteckigen Spaltkanal (siehe *Abbildungen 1 und 2*) vorgeführt. Es fällt dem Fachmann eine Übertragung auf andere Kanalformen nicht schwer.

5 6.1.1 Serienschaltung des passiven und aktiven Subsystems

Weiterhin wird zunächst die Realisierung der erfindungsgemäßen hybriden Absorberauskleidung in der Serienschaltung nach *Abbildung 4* diskutiert.

Für die Dimensionierung eines erfindungsgemäßen Schalldämpfers ist es zunächst hilfreich und
 10 wichtig, daß die akustische Wirksamkeit des aktiven Subsystems einfach durch eine akustische Impedanz Z_b an der Oberfläche des Schallgebers beschrieben werden kann, mit welcher das passive Subsystem (1) in *Abbildung 4* an dessen Rückseite abgeschlossen ist.

Das passive Subsystem ist ein linearer akustischer Vierpol. Nach den Regeln der Vierpolrechnung (siehe auch [1, Gl.(4.7)]) ergibt sich die Abschluß-Impedanz Z_b , mit welcher auf der Vorderseite des
 15 hybriden Absorbers die Absorberfunktion U_{wp} erreicht wird, aus der Formel

$$20 \quad Z_b = Z_h \frac{1 - \frac{U_{wp}}{k_0 h} Z_w}{\frac{U_{wp}}{k_0 h} Z_h - 1} \quad (7)$$

25 Dabei ist Z_h die Vorderseiten-Impedanz des passiven Subsystems allein, wenn es auf seiner Rückseite schallhart abgeschlossen ist (Leerlauf-Fall), und Z_w ist die Vorderseiten-Impedanz des passiven Subsystems allein, wenn es auf seiner Rückseite schallweich abgeschlossen ist (Kurzschluß-Fall).

Beispielhaft betrachten wir ein passives Subsystem bestehend aus einer Schicht der Dicke d eines
 30 porösen Absorbermaterials, welche auf ihrer Vorderseite durch eine dünne Deckschicht abgedeckt sei. Das poröse Absorbermaterial wird beschrieben durch den (mit Z_0 normierten) Strömungswiderstand $R = \varepsilon \cdot d / Z_0$ mit dem längenbezogenen Strömungswiderstand ε des porösen Absorbermaterials. Es ist bekannt, wie man daraus die (mit k_0 normierte) charakteristische Ausbreitungskonstante Γ_{an} und den charakteristischen (mit Z_0 normierten) Wellenwiderstand Z_{an} des porösen Absorbermaterials errechnet (siehe beispielsweise [2] oder [17]).

35 Die Deckschicht mit der Serien-Impedanz Z_s bestehe aus einer akustischen Parallelschaltung eines Reibungswiderstandes R_s mit einer Massenreaktanz einer flächenbezogenen Masse m_s . Dann folgt die Serienimpedanz Z_s der Deckschicht aus:

$$40 \quad Z_s = \frac{R_s \cdot (j k_0 h \frac{d}{h} \frac{m_s}{\rho_0 d})}{R_s + (j k_0 h \frac{d}{h} \frac{m_s}{\rho_0 d})} \quad (8)$$

mit der Luft-Dichte ρ_0 . Wählt man darin den Widerstandsterm R_s groß gegen den Reaktanzterm (2. Term im Nenner), dann beschreibt Z_s die Serienimpedanz einer Deckschicht bestehend aus einer (Massen-)Folie.
 50 Wählt man umgekehrt den Reaktanzterm groß gegen R_s , dann hat man einen reinen Reibungswiderstand, wie er beispielsweise durch Gewebe und Vliese dargestellt wird. Ist die Deckschicht dicht auf der porösen Absorberschicht aufgebracht, dann ist die Reaktanz der elastischen Abfederung durch die poröse Schicht noch parallel zu schalten. Da es hier nur um die Demonstration des Verfahrens geht, wird auf diese weitere Komplizierung verzichtet.

55 Die in der Gl.(7) benötigten Impedanzen Z_h und Z_w ergeben sich dann aus:

$$Z_h = Z_s + Z_{an} / \tanh(\Gamma_{an} \cdot k_0 h \cdot \frac{d}{h}) ; Z_w = Z_s + Z_{an} \cdot \tanh(\Gamma_{an} \cdot k_0 h \cdot \frac{d}{h}) \quad (9)$$

Damit ist für das gewählte Beispiel des passiven Subsystems die erfindungsgemäß erforderliche Abschlußimpedanz Z_b bekannt.

Die **Abbildung 14** zeigt beispielhaft die sogenannte "Ortskurve" der Abschlußimpedanz Z_b in der komplexen Ebene mit laufender Frequenzvariablen $f \cdot h$ in $\text{Hz} \cdot \text{m}$. Die in die Kurve eingezeichneten Punkte liegen in Terz-Abständen dieser Variablen. Diese Abbildung gilt für eine einfache poröse Absorberschicht (ohne Deckschicht) mit den Parametern $d/h=0,5$ und $R=0,5$. Die Kurve ist aus Kreisbögen zusammengesetzt, welche bekanntlich durch Resonanz-Systeme nachgebildet werden können (siehe unten bei "Aktives Subsystem"). Bei dem Kreisbogen rechts von der imaginären Achse geht Schallenergie in das aktive Subsystem hinein; hier stellt es im Prinzip einen elektronisch gesteuerten passiven Absorber dar. Da dieser Kreisbogen jedoch mit wachsender Frequenz entgegen dem Uhrzeigersinn durchlaufen wird, kann er nicht durch passive Bauelemente realisiert werden, weil nach einem fundamentalen Satz der Schaltungstheorie die Ortskurven passiver Schaltkreise immer rechtsdrehend durchlaufen werden. Darauf soll hingewiesen werden, da das Wort "aktiv" bei dem aktiven Subsystem nicht notwendigerweise (wenn auch in der Regel) gleichzusetzen ist mit akustischer Energieabgabe. Auf den Kurventeilen links von der imaginären Achse muß das aktive Subsystem tatsächlich Schallenergie in die Rückseite des passiven Subsystems hineinspeisen.

Für einen anderen Aufbau des passiven Subsystems aus einer porösen Absorberschicht mit $d/h=0,5$ und $R=1,0$, welche abgedeckt ist mit einer dichten Folie mit dem Massen-Parameter $m_p = m_s / (\rho_0 d) = 1,0$, zeigt die **Abbildung 15** die zugehörige Ortskurve der Abschlußimpedanz Z_b . Die Ortskurve besteht hier bei tiefen Frequenzen aus einem Kreisbogen eines Einkreis-Resonanzsystems und bei hohen Frequenzen angenähert aus der senkrechten Geraden einer Feder-Reaktanz. Das aktive Subsystem muß bei allen Frequenzen Energie abgeben.

In dem weiteren Beispiel von **Abbildung 16** ist die Ortskurve der Abschlußimpedanz für ein passives Subsystem aufgetragen aus einer porösen Absorberschicht mit den Parametern $d/h=0,5$ und $R=3,5$, welches in **Abbildung 10** als eine passive Absorberauskleidung mit Breitband-Charakter ausgewiesen ist. Die Form entspricht einem bedämpften Resonanzkreis, dessen Impedanz sich bei hohen Frequenzen zu einem Konvergenzpunkt in der Nähe von $Z_b = -1$ zusammenzieht.

Überhaupt haben die gezeigten Beispiele bei allen Unterschieden der Form gemeinsam, daß sie bei tiefen Frequenzen beim Wert $Z_b = -(R + R_s)$ starten und in der Nähe von $Z_b = -1$ bei hohen Frequenzen enden.

Die Verwendung einer porösen Absorberschicht in dem passiven Absorber ist nicht unumgänglich (wenn auch, wie unten noch gezeigt wird, vorteilhaft) für die Realisierung des Erfindungsgedankens. Man kann bei der Rechnung eine poröse Absorberschicht durch eine gleich dicke Luftschicht ersetzen, indem man für sie in den Formeln $\Gamma_{an} \rightarrow j$ und $Z_{an} \rightarrow 1$ einsetzt. Die **Abbildung 17** mit der Ortskurve der erfindungsgemäßen Abschlußimpedanz Z_b ist hierzu ein Beispiel für eine Luftschicht mit $d/h=0,5$, welche auf ihrer Vorderseite durch ein dichtes Vlies mit dem Serienwiderstand $R_s=2$ und dem Massenparameter $m_p=1$ abgedeckt ist. Wie man sieht, hat diese Ortskurve eine recht komplizierte Form. Damit soll aber nicht zum Ausdruck gebracht werden, daß es aus anwendungstechnischen Gründen nicht auch zweckmäßig sein kann, das passive Subsystem der erfindungsgemäßen Absorberauskleidung ohne poröse Absorberschicht, nur aus Folien, Membranen und Reibungswiderständen aufzubauen.

Der Aufbau des erfindungsgemäßen passiven Subsystems ist nicht auf die beispielhaft vorgetragene Schicht aus einem porösen Absorber mit einer Deckschicht beschränkt. In [16, Abs.4.4] ist ein Verfahren beschrieben für die Ermittlung der Vorderseiten-Impedanz eines M-fach geschichteten Absorbers, wobei einzelne Schichten auch Luftschichten sein können und die Schichten auch jeweils Deckschichten haben dürfen. Dieses sehr allgemeine Verfahren kann angewendet werden für die Ermittlung von Z_h und Z_w in Gl. (7), indem bei dem Verfahren der Reflexionsfaktor r_M der Schichtung an ihrer Rückseite zu $r_M=1$ (schallhart) beziehungsweise $r_M = -1$ (schallweich) gesetzt wird. Damit ist gezeigt, wie die Aufgabe der Bestimmung der Abschlußimpedanz Z_b als Teilaufgabe bei der Realisierung der Erfindung für praktisch jeden Aufbau des passiven Subsystems gelöst wird.

Die Ermittlung der erfindungsgemäßen Abschlußimpedanz ist auch nicht beschränkt auf die hier beispielhaft vorggeführten Rechenverfahren einer analytisch-numerischen Beschreibung des passiven Subsystems unter Verwendung von Abmessungen und Materialdaten, obwohl dieser Weg vorzuziehen ist, da er für die Dimensionierung des aktiven Subsystems (siehe unten) die besten Hinweise liefert. Man kann auch einen für die Anwendung der Erfindung vorgesehenen passiven Absorber direkt aufbauen und seine Eingangsimpedanz (einmal mit schallhartem Abschluß für Z_h und dann mit schallweichem Abschluß für Z_w) in Abhängigkeit von der Frequenz messen mit akustischen Impedanz-Messverfahren, welche in der Literatur mehrfach beschrieben und auch genormt sind. Zur Erstellung einer formelmäßigen Frequenzabhängigkeit kann man dann die mit den Meßwerten nach Gl.(7) gebildete Abschlußimpedanz Z_b einer numerischen

Regression mit bekannten Verfahren unterwerfen. Bei der Auswahl der Funktionen, nach welchen man die Regression ausführt, kann dabei zweckmäßigerweise gleich die Struktur des aktiven Subsystems berücksichtigt werden (siehe unten).

5 Damit ist gezeigt, daß man bei der Bestimmung der erfindungsgemäßen Abschlußimpedanz Z_b alle passiven Subsysteme einbeziehen kann, deren Eingangsimpedanz berechenbar und/oder meßbar ist.

Bei dem Aufbau einer erfindungsgemäßen Absorberauskleidung ist die Ermittlung der erfindungsgemäßen Abschlußimpedanz Z_b ein Zwischenschritt für den Entwurf des aktiven Subsystems. Z_b ist die akustische Eingangsimpedanz dieses in Serie geschalteten aktiven Subsystems. Der wesentliche Teil des aktiven Subsystems ist die akustische Impedanz Z_m der Lautsprechermembrane, da nur sie durch
10 elektronische Steuerung beeinflussbar ist. Nun enthält bei technischen Anwendungen der Erfindung die Abschlußimpedanz Z_b in der Regel noch akustische Anteile, welche elektronisch nicht beeinflussbar sind. Einen solchen Anteil liefert beispielsweise die "Lautsprecherbox", mit welcher der Lautsprecher rückseitig eingefast wird. Eine solche Lautsprecherbox ist meist erforderlich, einmal um zu vermeiden, daß der Schall der Lautsprecherschwingung nach außen abgestrahlt wird, ferner aber auch um zu vermeiden, daß der
15 Druck der Kanalströmung auf die Membrane drückt.

Die **Abbildung 18** zeigt schematisch eine erfindungsgemäße hybride Absorberauskleidung unter Einschluß einer Lautsprecherbox. Vielfach wird die Lautsprecherbox teilweise mit Schallabsorptionsmaterial gefüllt, um so störende Resonanzen der Membran-Masse mit der Federsteife des Luftpolsters in der Box zu vermeiden (es kann jedoch auch vorteilhaft sein, diese Resonanz gezielt auszunutzen, um eine der
20 Resonanz-Schleifen der Ortskurve von Z_b akustisch zu realisieren !). In diesen Fällen ist die Lautsprecherbox wiederum als geschichteter Absorber mit einem schallharten Abschluß zu beschreiben. Nun sind fast ausnahmslos Lautsprechermembranen inkompressibel und dünn im Vergleich zur Schallwellenlänge (zumindest in dem hier interessierenden Frequenzbereich). Die Abschlußimpedanz Z_b entsteht deshalb aus einer Serienschaltung der gesuchten Membranimpedanz Z_m mit der Eingangsimpedanz Z_e der Box, welche
25 hinter der Membrane gemessen wird: $Z_m = Z_b - Z_e$. Die Abschlußimpedanz Z_b wird weiterhin nach Gl.(7) ermittelt. Die Eingangsimpedanz Z_e erhält man durch Anwendung des in [16, Abs.4.4] beschriebenen Rechenverfahrens für die Eingangsimpedanz geschichteter Absorber. Somit ist diese Teilaufgabe in gleicher Allgemeinheit lösbar wie die Bestimmung von Z_b .

Die **Abbildung 19** zeigt die erfindungsgemäß einzustellende Ortskurve der Membran-Impedanz Z_m eines Aufbaus nach **Abbildung 18**, wobei der Luftspalt vor dem Lautsprecher (über dessen Bedeutung siehe unten) hier 10% der Schichtdicke vor dem Lautsprecher beträgt und die Lautsprecherbox zu 80% mit Absorbermaterial gefüllt ist. Die gesamte Absorberauskleidung ist auf ihrer Vorderseite mit einer Folie mit Massenparameter $m_p=2$ abgedeckt. Die Variable $f \cdot h$ (Punkte auf der Kurve wieder in Terz-Abständen) durchläuft in dieser Abbildung den Wertebereich von ca. 4[Hz·m] bis 100[Hz·m].

35 Sowohl für die Beantwortung der Frage, mit welchen Näherungen man arbeiten darf, um erfindungsgemäß "den Wendungspunkt anzunähern", als auch für die Auslegung des aktiven Subsystems ist es außerordentlich hilfreich, daß man für die vorzüglich interessierenden tiefen Frequenzen unter Verwendung der in [16, Gl.(4.16a), (4.16b) und Gl.(6.78)] angegebenen Näherungen für die Absorber-Kennwerte Γ_{an} , Z_{an} sowie für ihr Produkt $\Gamma_{an} \cdot Z_{an}$ und ihren Quotienten Γ_{an} / Z_{an} analytische Näherungen für die erfindungsgemäße Membran-Impedanz Z_m herleiten kann:

$$\begin{aligned}
 Z_m \approx & \frac{k_0 h}{U_{wp}} - \sum_{i=1}^{M-1} [Z_{s,i} + 1,05 \cdot \frac{\Xi_i \cdot d_i}{Z_0} + j \cdot 0,775 \cdot k_0 h \cdot \frac{d_i}{h}] + \\
 & + j \frac{0,775}{k_0 h \cdot \frac{d_{box}}{h} \cdot \sum_{i=1}^{M_{box}} \frac{d_{box,i}}{d_{box}}}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Läßt man den letzten Bruch weg, entsteht die Abschlußimpedanz Z_b . Dabei ist angenommen, daß der
55 passive Absorber vor dem Lautsprecher geschichtet ist mit M Absorberschichten (einschließlich eventueller Luftschichten) der Dicken d_i mit den längenbezogenen Strömungswiderständen Ξ_i und Deckschichten mit Serienimpedanzen $Z_{s,i}$. Ebenso sei in der Lautsprecherbox mit der Gesamttiefe d_{box} eine Anzahl M_{box} Absorberschichten (einschließlich eventueller Luftschichten) mit den Dicken d_i . Da bei tiefen Frequenzen

die Massenreaktanz von Deckschichten meist vernachlässigbar ist, geht dort $Z_{s,i} \rightarrow R_{s,i}$ gegen die Reibungswiderstände der Deckschichten. Dann wird Z_b ein lineares Polynom in $k_0 h$ und in Z_m kommt eine Reaktanz hinzu mit dem Vorzeichen einer Massenreaktanz und der Frequenzabhängigkeit einer Federreaktanz. Die elektronische Synthese dieser Näherung im aktiven Subsystem ist sehr einfach. Diese Näherung wird unten verwendet für Beispiele zu Dämpfungskurven erfindungsgemäßer Schalldämpfer.

6.1.2 Parallelschaltung des passiven und aktiven Subsystems

Bei der hybriden Absorberauskleidung in Serienschaltung nach *Abbildung 4* unterstützt das aktive Subsystem den passiven Absorber, indem es diesem eine zweckdienliche Abschlußimpedanz Z_b erzeugt.

Die primäre Erfindungsaufgabe besteht aber darin, an der Vorderseite der Absorberauskleidung eine Absorberfunktion $U = k_0 h \cdot G = U_{wp}$ zu erzeugen. Diese ist proportional der wirksamen Wandadmittanz G . Es gehört nun zu den Grunderfahrungen der Akustik, daß bei flächig strukturierten Absorberoberflächen die akustisch wirksame Admittanz der Flächen-Mittelwert der Admittanzen der einzelnen Teilflächen ist, solange die Abmessungen der Teilflächen klein bleiben zur Schallwellenlänge (typischerweise kleiner als etwa eine viertel Schallwellenlänge). Diese Bedingung schafft bei den hier vorzugsweise interessierenden tiefen Frequenzen keine Probleme.

Sei also F_p die Fläche des passiven Teils der Absorberauskleidung mit einer Wandadmittanz G_p an der Oberfläche und F_a die Fläche des aktiven Teils mit einer Admittanz G_a an der Oberfläche, dann muß nach der Erfindung sein:

$$U_{wp} = k_0 h \cdot \left(\frac{F_p}{F_p + F_a} G_p + \frac{F_a}{F_p + F_a} G_a \right) \quad (11)$$

Die Admittanz G_a des aktiven Teils wird somit erfindungsgemäß durch

$$G_a = \left(1 + \frac{F_p}{F_a} \right) \frac{U_{wp}}{k_0 h} - \frac{F_p}{F_a} G_p \quad (12)$$

bestimmt.

Nach den oben beschriebenen Verfahren kann dann sowohl die Admittanz G_p für beliebig geschichtete passive Absorber ermittelt werden. Ferner kann auch die Abschlußimpedanz Z_b und/oder die Membran-Impedanz Z_m des aktiven Teils, welcher seinerseits zwischen der kanalseitigen Oberfläche und der Lautsprechermembrane einen geschichteten Absorber enthalten kann oder mit einer Lautsprecherbox abgeschlossen sein kann, nach den dortigen Verfahren ermittelt werden.

6.1.3 Mischtypen aus Serienschaltung und Parallelschaltung des passiven und des aktiven Subsystems

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung kann die hybride Absorberauskleidung aus Mischtypen der Serienschaltung und der Parallelschaltung des passiven Subsystems mit dem aktiven Subsystem bestehen.

In einer in der Auslegung einfachen aber apparativ aufwendigen Mischform nach *Abbildung 20* werden die beiden Grundtypen räumlich nebeneinander angeordnet. Von größerem Interesse ist die Ausgestaltung der Erfindung nach *Abbildung 21*, wo ein aktives Subsystem sowohl in Serienschaltung als auch in Parallelschaltung zu einem passiven Subsystem arbeitet. Damit lassen sich günstige Frequenzkurven für die Übertragungsfunktion des Signalformers realisieren.

Eine bevorzugte Mischform des erfindungsgemäßen hybriden Absorbers ist schematisch in *Abbildung 22* dargestellt. Bei ihr arbeitet die Vorderseite des Lautsprechers in Serienschaltung auf einen passiven Absorber, und die Rückseite erzeugt eine Paralleladmittanz G_a in Parallelschaltung. Dies ist möglich, da die Paralleladmittanz G_a den Charakter einer passiven Admittanz haben muß, die Abschlußimpedanz Z_b aber, wie die Beispiele oben zeigen, vielfach den Charakter einer negativen passiven Impedanz hat. Dieser

Vorzeichenwechsel stellt sich automatisch ein, wenn man die Vorder- und die Rückseite der Lautsprecher-membrane als aktiven Signalgeber benutzt. Man kann sich mit dieser Ausformung der Erfindung auch den Platzbedarf einer Lautsprecherbox ersparen, und der Druckausgleich des Strömungsdrucks über den Lautsprecher ist ebenfalls gegeben.

- 5 Bei den Mischformen kann das Steuersignal für das aktive Subsystem je nach Zweckmäßigkeit entweder im Teil der Serienschaltung oder im Teil der Parallelschaltung durch den Signalaufnehmer (Mikrofon) aufgenommen werden.

7. Aktives Subsystem

10

Das aktive Subsystem mit dem schematischen Aufbau einer möglichen Ausgestaltung der Erfindung nach *Abbildung 3* hat die Aufgabe, eine vorgeschriebene akustische Impedanz zu erzeugen. Diese Impedanz ist das Verhältnis des Schalldrucks an der schwingenden Oberfläche (Membrane) des Signalgebers zu der über die Fläche gemittelten Schnelle dieser Oberfläche.

- 15 Hierbei wurde ein für die Realisierung wichtiger Vorteil der Erfindung gegenüber der Aufgabenstellung des aktiven Schallschutzes bereits eingebracht, nämlich der, daß es auf die genaue Schwingungsverteilung der Membrane nicht ankommt. Unterschiede der Schwing-Amplitude und -Phase können sich nämlich in dem vorgeschalteten passiven Absorber (bei Serienschaltung) oder in der vorgeschalteten Kammer (bei Parallelschaltung) über den Querschnitt ausgleichen, sodaß an der kanalseitigen Oberfläche des hybriden
20 Absorbers gleichwohl flächig konstante Wandimpedanzen entstehen. Einem solchen Querausgleich des Schallfeldes ist besonders förderlich ein Luftspalt zwischen der Membrane und dem passiven Absorber, wie er in den *Abbildungen 4, 18, 20, 21 und 22* angedeutet ist.

- Ein weiterer, gegenüber der Aufgabenstellung des aktiven Schallschutzes bedeutsamer Vorteil der Erfindung liegt darin, daß das benötigte, durch den Signalaufnehmer (Nr. (1) in *Abbildung 3*) erfaßte
25 Steuersignal nicht der Schalldruck *ohne* den Beitrag des aktiven Subsystems ist, sondern der *tasächliche* Schalldruck, der eine Überlagerung darstellt aus dem Schalldruck des zu mindernden Lärms, welcher von vorne durch den passiven Absorber dringt, und aus dem Schalldruck des Lautsprechers des aktiven Systems. Die vorn beschriebenen Schwierigkeiten der Steuerung beim aktiven Schallschutz, nämlich den Beitrag des aktiven Systems aus dem Steuersignal erst eliminieren zu müssen, entfallen bei der vorgeleg-
30 ten Erfindung völlig vom Ansatz des Erfindungsgedankens her.

- Ein Prinzipschema des aktiven Subsystems in einer Grundform für die Realisierung der Erfindung zeigt *Abbildung 23*. Ein Mikrofon (1) nimmt den Schalldruck p vor dem Lautsprecher (5) auf. Zusammen mit einem unter Umständen erforderlichen Mikrofonverstärker (2) wird der Druck p in eine elektrische Spannung u_1 übertragen. Am anderen Ende der Signalkette erzeugt ein Lautsprecher (5) eine Schallschnelle v seiner
35 Membrane durch Ansteuerung des Lautsprechers über einen Leistungsverstärker (4) mit der elektrischen Spannung u_2 . Der Signalformer (3) dient dann der erfindungsgemäßen Umformung des Mikrofonsignals, um die geforderte akustische Abschlußimpedanz $Z_b = p/v$ zu erzielen. Die dargestellte Unterteilung des passiven Subsystems ist eher eine funktionale Unterteilung als eine Aufzählung notwendiger Komponenten. So können die erforderlichen Verstärkungen ohne weiteres auch in den Signalformer integriert sein.
40 Besonders übersichtlich wird die Funktion des erfindungsgemäßen Signalformers, wenn man annimmt, daß sowohl auf der Mikrofonseite der Zusammenhang zwischen p und u_1 linear ist und unabhängig von der Frequenz als auch auf der Lautsprecherseite eine solche Beziehung besteht zwischen v und u_2 . Dann ist der durch den Signalformer zu erzielende Übertragungsfaktor u_1/u_2 bis auf einen frequenzunabhängigen Faktor gleich der erfindungsgemäßen Abschlußimpedanz Z_b beziehungsweise der Membranimpedanz Z_m .

- 45 Der hier angenommene frequenzunabhängige lineare Zusammenhang zwischen p und u_1 ist mit üblicher Mikrofontchnik kein Problem in dem hier interessierenden Frequenz- und Amplitudenbereich. Dagegen besitzen Lautsprecher in der Regel einen Frequenzgang der akustischen Schwingung bei konstanter elektrischer Ansteuerung. Die Darstellung und Berechnung dieses Frequenzganges aus den konstruktiven Daten des Lautsprechers ist mit Standardmethoden der Elektroakustik möglich (siehe be-
50 spielsweise [18,19]). Ebenso gehören Methoden zur Verringerung dieses Frequenzganges zum Stand der Technik. Es muß deshalb hier nicht näher darauf eingegangen werden. Im Zusammenhang mit der Erfindung genügt es, wenn man die verbleibende Frequenzabhängigkeit des Lautsprechers in die durch den Signalformer zu erzielende Frequenzabhängigkeit seiner Übertragungsfunktion mit einbezieht (als Multiplikation von Übertragungsfaktoren oder durch Addition von Übertragungsmaßen, welche jeder(s) für sich
55 bekannt sind); es wird dann nachfolgend von dem "kombinierten" Übertragungsfaktor des Signalwandlers gesprochen.

Diese Einbeziehung des Lautsprecher-Frequenzganges in den kombinierten Übertragungsfaktor des erfindungsgemäßen Signalformers macht die Anwendung der Erfindung weitgehend unabhängig vom

gewählten Typ des Lautsprechers (elektrodynamischer, elektrostatischer oder magnetodynamischer Lautsprecher). Die Auswahl kann erfolgen nach Gesichtspunkten des Übertragungsbereichs des Lautsprechers, nach Kosten, nach Betriebssicherheit und nach einfacher Realisierung dieses kombinierten Übertragungsfaktors.

Die Realisierung dieses kombinierten elektrischen Übertragungsfaktors ist dann die letzte Teilaufgabe zur Anwendung der Erfindung. Die Funktion des Signalformers ist in der betrachteten Grundform der Erfindungs-Umsetzung im wesentlichen die eines frequenzabhängigen elektrischen Filters. Die erfindungsgemäß erforderliche Filtercharakteristik (Frequenzkurve des Übertragungsfaktors nach Betrag und Phase) ist durch Anwendung der beschriebenen Lösungsmethoden für die Teilaufgaben bekannt.

Wenn man davon ausgeht, daß mit heutigen bekannten digital-elektronischen Methoden praktisch jede Übertragungsfunktion mit vertretbaren Kosten realisierbar ist, welche mathematisch (mit einigermaßen stetigen Funktionen) beschreibbar ist, dann ist auch diese letzte Teilaufgabe zur Anwendung der Erfindung als durch an sich bekannte Techniken gelöst anzusehen.

Gleichwohl besteht ein Kosteninteresse daran, den Frequenzgang des kombinierten Übertragungsfaktors durch geeignete Auswahl und Kombination des passiven Subsystems und des Lautsprechers möglichst einfach zu halten. Wie die oben beispielhaft gezeigten Ortskurven der Abschlußimpedanz Z_b und der Membranimpedanz Z_m gezeigt haben, ist es ein Vorteil der Erfindung, daß hier Gestaltungsspielräume bestehen. So ist es durch solche geschickte Kombinationen möglich, den erfindungsgemäßen kombinierten Übertragungsfaktor auch in elektronischer Analogtechnik zu realisieren. Hierfür steht eine leistungsfähige elektronische Schaltungstechnik zur Verfügung, sodaß auch darauf hier nicht näher eingegangen werden muß.

Von gewissem Interesse sind ferner Realisierungen des erfindungsgemäßen kombinierten Übertragungsfaktors durch elektronische "Hybrid-Technik", das heißt durch Kombination analoger mit digitalen Komponenten, und zwar insbesondere bei den selbst-adaptierenden aktiven Subsystemen, mit denen - wie weiter unten noch dargelegt wird - Änderungen der Betriebstemperatur und/oder der Strömungsgeschwindigkeit im Schalldämpfer "nachgefahren" werden können.

Wie oben bereits wiederholt angemerkt wurde, besteht ein Vorteil des erfindungsgemäßen Hybridabsorbers darin, daß man durch geeignete Auswahl der Komponenten des passiven Absorbers der Ortskurve der Abschlußimpedanz Z_b solche Formen geben kann, welche durch einfache elektronische Schaltungen im aktiven Subsystem realisiert werden können.

Eine weitere zweckmäßige Ausgestaltung der Erfindung wird anhand von **Abbildung 24** beschrieben. Die **Abbildungen 4, 5, 18, 20, 21, 22** zeigen je ein erfindungsgemäßes hybrides Absorberelement. Zur Auskleidung eines Schalldämpfers werden in der Grundform der Erfindung mehrere dieser Elemente in Richtung der Kanalachse (Schallausbreitungsrichtung) hintereinander angeordnet, bis eine Länge des Schalldämpfers entsteht, welche die geforderte Durchgangsdämpfung liefert. Die **Abbildung 24** zeigt nun schematisch, daß in dieser Ausgestaltung der Erfindung weder das Steuermikrofon noch der Signalformer bei jedem Element wiederholt werden müssen. Es sind nämlich über die Ausbreitungskonstant $\Gamma = \Gamma' + j\Gamma''$ im Dämpferkanal sowohl die Abnahme des Schalldruckpegels zwischen benachbarten hybriden Absorberelementen der Breite a (nämlich $8,68 \cdot \Gamma' a$ dB) als auch die Phasendrehung ϕ (nämlich $180 \cdot \Gamma'' a / \pi$ Grad) bekannt. In einer elektrischen Kettenschaltung werden in **Abbildung 24** diese Pegel- und Phasen-Änderungen in der Anregung hintereinanderliegender Lautsprecher nachgebildet.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung nutzt man aus, daß Lautsprecher reziproke Wandler sind; das heißt, sie sind nicht nur zur Schallerzeugung dienlich, sondern können auch als Schallaufnehmer betrieben werden. Bei der Anwendung dieser Eigenschaft auf die Erfindung wird der Lautsprecher des aktiven Subsystems in "Schaltpausen" als Schallaufnehmer geschaltet, welcher den Schalldruck mißt, der von dem Dämpferkanal durch den passiven Absorber dringt. Für diese Schaltpausen reichen Zeitspannen von einer bis wenige Sekunden Dauer. Damit kann das Steuermikrofon entfallen; es wird durch einen zeitlich getakteten Schalter ersetzt.

In den bisherigen Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen aktiven Subsystems ist dessen Realisierung im wesentlichen eine elektronische Steueraufgabe, worin übrigens ein Vorteil der Erfindung gegenüber den Methoden des aktiven Schallschutzes gesehen wird, da diese grundsätzlich eine Regelaufgabe darstellen. In einer unter Umständen zweckmäßigen Ausgestaltung der Erfindung kann die erfindungsgemäße Funktion des aktiven Subsystems aber auch als regeltechnische Aufgabe konzipiert werden. Das Prinzip sei anhand der schematischen **Abbildung 25** erläutert. In Ergänzung zu der Grundausstattung nach **Abbildung 3** wird durch einen auf der Lautsprechermembrane aufgesetzten Körperschallaufnehmer (4) die Schallschnelle v der Membrane aufgenommen. Damit wird der Signalformer mit an sich bekannten regeltechnischen Methoden so geregelt, daß der Quotient aus dem vom Mikrofon aufgenommenen Druck p und der vom Körperschallaufnehmer aufgenommenen Schallschnelle v die erfindungsgemäß erforderliche Abschlußimpe-

danz Z_b bildet. Diese Ausgestaltung als Regelaufgabe kann zweckmäßig" sein zum Ausgleich schwer voraussagbarer Änderungen in den Eigenschaften des passiven Subsystems, sei es beispielsweise durch Fertigungsschwankungen des passiven Absorbers, sei es durch schwer voraussagbare Temperaturprofile in letzterem oder sei es durch dessen Änderungen während des Betriebs des Schalldämpfers, zum Beispiel durch Schmutzablagerungen.

Man kann auch in einer weiteren regeltechnischen Ausgestaltung der Erfindung die primäre Zielgröße des Schalldämpfers, nämlich den Schallpegel-Abfall auf einer Strecke Δx des Kanals als Steuergröße für die Optimierung der erfindungsgemäßen Abschlußimpedanz benutzen. Dazu mißt man nach der Schemazeichnung der *Abbildung 26* den Schalldruck an zwei hintereinander in einem zweckmäßigen Abstand befindlichen Mikrofonorten und regelt den Betrag und die Phase der Lautsprecherschwingung so, daß dieser Pegelabfall maximiert wird.

8. Nebeneffekte und weitere Ausgestaltungen

Für die technische Anwendbarkeit einer Erfindung - und damit für ihren Erfindungswert - ist maßgeblich, wie anwendungstechnisch bedingte Abweichung von Standardsituationen sich auf die angestrebte Leistung einer Erfindung - hier auf die erzielbare Schalldämpfung - auswirken.

Eine erste bisher stillschweigend angenommene Standardsituation ist das Vorliegen eines überwiegend symmetrischen Schallfeldes, welches von der Lärmquelle herkommend auf den Schalldämpfer einfällt (symmetrisch heißt: gleichphasige Schwingung des Schallfeldes beiderseits der Symmetrieebene des Dämpferkanals). Dies ist in der Tat meistens der Fall. Es sind jedoch auch Sondenfälle der Schallquelle und/oder der Kanalführung vor dem Schalldämpfer denkbar, wo die Schallfeld-Schwingung überwiegend antisymmetrisch ist (gegenphasig beiderseits der Symmetrieebene). Dann gilt statt der Bestimmungsgleichung (5) die Bestimmungsgleichung (6). Dies ist bei der Auslegung des erfindungsgemäßen Schalldämpfers mit rechteckigem Querschnitt einfach dadurch zu berücksichtigen, daß nach [5] für die Absorberfunktion U im Windungspunkt der Wert $U_{wp} = 3,71944 + j \cdot 1,89528$ zu verwenden ist.

Eine zweite Standard-Annahme ist, daß die kanalseitige Oberfläche der Absorberauskleidung homogen ist, das heißt ohne Störstellen und Strukturen. Durch den Aufbau der erfindungsgemäßen Absorberauskleidung aus hybriden Absorberelementen, insbesondere bei Anwendung der Parallelschaltung oder gemischter Anordnungen, entstehen Oberflächenstrukturen. Nun ist aber bekannt, daß solche Störstellen allenfalls höhere Moden erzeugen. Da diese aber stärker bedämpft sind als die niedrigst bedämpfte Mode, für welche der erfindungsgemäße Schalldämpfer ausgelegt ist, kann eine nachteilige Auswirkung ausgeschlossen werden.

Schalldämpfer in technischen Anlagen werden oft bei erhöhten Betriebstemperaturen eingesetzt. Durch diese ändern sich die akustischen Eigenschaften des schallführenden Mediums im Dämpferkanal. Nun ist aber zu beachten, daß die oben vorgeführten Auslegungsschritte in dimensionsloser Form beschrieben wurden. Sie gelten also für jedes gasförmige Medium, insbesondere also auch für ein durch erhöhte Temperatur und/oder Zusammensetzung (Rauchgas!) gegenüber normaler Luft geändertes Medium. Diese Betriebsbedingungen äußern sich nur dann, wenn man Zahlenwerte für die auftretenden Materialkonstanten einsetzt. Diese sind die Schallgeschwindigkeit c_o in $k_o = 2\pi f/c_o$, die Dichte ρ_o in $Z_o = \rho_o c_o$, ferner die Viskosität und der Adiabatenexponent in α und damit in Γ_{an} und Z_{an} . Der Einfluß von Temperatur und Gaszusammensetzung auf diese Größen ist aus der Thermodynamik bekannt. Er kann also in die Ermittlung der Abschlußimpedanz Z_b mit einbezogen werden, wenn man einen erfindungsgemäßen Schalldämpfer auf eine bestimmte Betriebstemperatur und/oder Gaszusammensetzung auslegen will. Wenn sich die Betriebstemperaturen während des Betriebes häufig und beträchtlich ändern, kann es erforderlich sein, statt mit einer Auslegung auf eine bestimmte Betriebstemperatur zu operieren, ein selbst-adaptierendes aktives Subsystem vorzusehen. Dies wird in der Regel eine digitale oder hybride elektronische Regeltechnik für den Signalformer erforderlich machen, bei welchen dann die Berücksichtigung einer über ein Thermometer erfaßten Betriebstemperatur keine grundsätzlichen Probleme stellt.

Etwas komplizierter ist die Berücksichtigung einer Strömung mit einer Strömungsgeschwindigkeit V_o und einer Machzahl $M_o = V_o/c_o$. Strömungsakustisch läßt sich die Strömungsüberlagerung vollständig erfassen, indem man überall, wo k_o auftritt, dies ersetzt durch:

$$k_o \rightarrow k_o \cdot w \quad (13)$$

mit dem sogenannten "Strömungsfaktor"

$$w = 1 + jM_0 \frac{\Gamma}{k_0} \quad (14)$$

Zwar empfiehlt die theoretisch-akustische Literatur auch noch eine Änderung der Randbedingung (von Schnelle-Anpassung zu Elongations-Anpassung an Randflächen), was zu der weiteren Ersetzung $G_w \rightarrow G_w \cdot w$ führen würde, jedoch zeigen Vergleiche zwischen Messung und Rechnung eine bessere Übereinstimmung, wenn man diese zusätzliche Ersetzung nicht vornimmt. Damit geht die Gl.(4) über in:

$$\Gamma h = \frac{1}{1 - M_0^2} [-jM_0 \cdot k_0 h + \sqrt{z^2(1 - M_0^2) - (k_0 h)^2}] \quad (15)$$

wobei für z nunmehr statt Gl.(5) die Bestimmungsgleichung gilt:

$$z \cdot \tan(z) = jU \cdot w \quad (16)$$

und entsprechend wird bei den anderen oben angegebenen Bestimmungsgleichungen $U \rightarrow U \cdot w$ ersetzt. Durch das Auftreten des Strömungsfaktors w in den Bestimmungsgleichungen verschiebt sich nun auch der Windungspunkt $U_{wp}(M_0)$ in Abhängigkeit von der Machzahl. Mit dem in [5] beschriebenen Verfahren läßt sich bei einer gegebenen Machzahl M_0 der zugehörige Windungspunkt numerisch bestimmen. Dabei wird M_0 positiv angesetzt, wenn Schall und Strömung im Schalldämpfer die gleiche Richtung haben, und M_0 wird negativ angesetzt wenn sie einander entgegengesetzt gerichtet sind.

In der Anwendung auf den erfindungsgemäßen Schalldämpfer heißt die Berücksichtigung einer Strömungsüberlagerung demnach im wesentlichen einen Austausch der Konstanten U_{wp} . Falls sich die Strömungsgeschwindigkeit während des Betriebes des Schalldämpfer häufig und stark ändert, besteht eine zweckmäßige Ausgestaltung der Erfindung darin, daß man mit an sich bekannten Verfahren der Regeltechnik diese Änderung der Konstanten U_{wp} in einem selbstadaptierenden aktiven Subsystem einführt unter Verwendung der Anzeige eines Strömungsgeschwindigkeit-Meßgerätes. Bei einfachen Frequenzgängen des kombinierten Übertragungsfaktors läßt sich dies in elektrischer Analogtechnik bewerkstelligen, bei komplizierteren Frequenzabhängigkeiten kann eine Regelung in hybrider oder in digitaler Technik angezeigt sein.

9. Technischer Fortschritt der Erfindung

Der technische Fortschritt der Erfindung des hybriden Schalldämpfers gegenüber dem Stand sowohl der passiven Dämpfer-Technik als auch (und insbesondere) gegenüber der aktiven Dämpfertechnik soll kurz dargestellt werden. Dabei werden sich auch weitere Einzelheiten einer vorzugsweisen Ausgestaltung der Erfindung ergeben.

Zunächst sei die Wichtigkeit der Aufgabe, die Schalldämpfung von Schalldämpfern in technischen Anlagen zu verbessern, an einem praktischen Beispiel erläutert. Ein Abgasschalldämpfer in Kulissenbauweise nach **Abbildung 2** für ein mittelgroßes thermisches Kraftwerk hatte bei optimierter Auslegung nach **Abbildung 10** eine Länge $L=7\text{m}$ bei einer Gesamt-Breite und -Höhe von $7 \times 7 \text{ m}^2$. Die Kulissendicken waren $D=0,2 \text{ m}$, die Spaltweiten $H=0,1 \text{ m}$, also $d/h=2$. Die Absorberfüllung hatte einen Strömungswiderstand $R=1,7$. Aus **Abbildung 10** liest man dann bei $f=100 \text{ Hz}$, das heißt bei $f \cdot h=5 \text{ Hz} \cdot \text{m}$ eine Dämpfung $D_n=0,1 \text{ dB}$ ab. Der Schalldämpfer hat bei dieser Frequenz eine Gesamtdämpfung von $D_d=14 \text{ dB}$. Bei der Frequenz $f=50 \text{ Hz}$, bei welcher ebenfalls noch Schallschutzanforderungen gestellt waren, betrug die Gesamtdämpfung nur noch $D_d=3,5 \text{ dB}$. Aus einem Richtpreis pro Quadratmeter Kulissenfläche ergibt sich ein Schalldämpferpreis von rund $0,5 \text{ Mio DM}$. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den Kulissenspalten betrug $V_0=50 \text{ m/s}$. Daraus folgt ein Widerstandsbeiwert (das Verhältnis von Druckverlust zu dynamischem Druck der Strömung) von $\zeta=2,5$. Mit diesen Angaben kann man errechnen, daß die Strömungsverlustleistung im Schalldämpfer, welche von den Gebläsen erbracht werden muß, um die Luft durch den Schalldämpfer zu drücken, rund 3 000 kW beträgt; bei einem Wirkungsgrad von 80% der Gebläse wird dafür eine elektrische Leistung von rund 3 800 kW aufgebracht. Mit einem Stromtarif von $0,10 \text{ DM/kWh}$ verursacht der Schalldämpfer infolge seines Druckverlusts jährliche Betriebskosten von $3,33 \text{ Mio DM/a}$, also das Vielfache seines Anschaffungswertes. Hier wurde noch bei einer Gasströmung mit Normaltempera-

tur T_0 gerechnet. Bei einer höheren Betriebstemperatur von T Kelvin erhöht sich bei gleichem Massedurchsatz die Verlustleistung um den Faktor $(T/T_0)^{2,5}$, bei einer Betriebstemperatur von rund 300 Grad Celsius also um rund den Faktor 5,8, was zu jährlichen Betriebskosten von rund 19,3 Mio DM/a führt.

Unter der Annahme, daß man den Gesamtquerschnitt des Schalldämpfers beibehält, könnte mit einem erfindungsgemäßen Schalldämpfer, welcher auf $D_h = 9,5$ dB ausgelegt ist (siehe Dämpfungsbeispiele unten) mit einem Ausstellungsverhältnis $d/h = 0,5$ nicht nur die Dämpfung bei $f = 50$ Hz auf $D_d = 15$ dB und bei $f = 100$ Hz auf $D_d = 25$ dB erhöht werden, außerdem ließe sich die Strömungsgeschwindigkeit auf $V_0 = 25$ m/s halbieren und der Widerstandsbeiwert ginge auf $\zeta = 0,35$ zurück. Damit würden sich die Betriebskosten (bei Normaltemperatur) auf rund 62 TDM/a verringern, und bei Warmbetrieb auf rund 360 TDM/a. Selbst ein mehrfach teurerer erfindungsgemäßer Schalldämpfer hätte (bei deutlich besserem Schallschutz !) seine höheren Investitionskosten nach kurzer Zeit aus der Betriebskosten-Ersparnis refinanziert (abgesehen davon, daß die Gebläse wegen der geringeren erforderlichen Leistung billiger würden !).

Die **Abbildung 27** zeigt als Beispiel für eine Anwendung der Erfindung als durchgezogene Kurve die Dämpfung für einen hybriden Absorber bestehend aus einer Mineralfaserschicht mit den Parametern $d/h = 0,5$ und $R = 0,5$ und einem aktiven Subsystem, welches eine lineare Näherung der Gl.(7) in $k_0 h$ für die Abschlußimpedanz Z_b erzeugt, deren exakte Ortskurve für dieses Beispiel in **Abbildung 14** dargestellt ist. Zum Vergleich ist gestrichelt die Dämpfungskurve mit dem passiven Absorber allein eingezeichnet. Dieses Beispiel zeigt nicht nur den hohen Zugewinn an Dämpfung bei tiefen Frequenzen durch den erfindungsgemäßen Schalldämpfer, es veranschaulicht ferner, daß man solche Zugewinne bereits mit einfachen Näherungen an die vorgeschriebene Abschlußimpedanz Z_b erzielen kann, und es legt eine weitere Ausgestaltung der Erfindung nahe. Bei Frequenzen oberhalb circa $f_h = 70$ Hz·m gilt die verwendete Näherung für Z_b offensichtlich nicht mehr; hier erzeugt die Absorberauskleidung allein des passiven Subsystems höhere Dämpfungen als die Absorberauskleidung mit dem hybriden Absorber in der verwendeten Auslegung. In solchen Fällen liegt es nahe, das aktive Subsystem bei höheren Frequenzen "abzuschalten". Dies bedeutet, daß die Abschlußimpedanz Z_b dann hohe Beträge haben soll. Das läßt sich bei einem Hybrid-Absorber in Serienschaltung und bei einem elektrodynamischen Lautsprecher einfach dadurch realisieren, daß der Signalförmiger einen elektrischen Kurzschluß am Lautsprecher erzeugt. Dann wird die Membrane bekanntlich elektrodynamisch "festgebremst".

Des weiteren zeigt die **Abbildung 28** die Dämpfungskurven eines hybriden Absorbers (durchgezogen) mit einem Aufbau und einer exakten Ortskurve für Z_b wie in **Abbildung 15**, wobei hier ebenfalls wieder eine Näherung an den exakten Verlauf benutzt wurde, sowie (gestrichelt) die Dämpfungskurve mit dem passiven Absorber allein. Dieses Beispiel ist für die praktische Anwendung deshalb von Interesse, weil die Absorberschicht an ihrer Vorderseite durch eine Folie (mit $m_p = 1$) abgedeckt ist, wodurch der hybride Absorber wirksam gegen eventuellen Schmutz in der Kanalströmung geschützt werden kann.

Die letzte **Abbildung 29** zeigt schließlich entsprechende Dämpfungskurven für eine nach **Abbildung 10** bereits breitbandig dimensionierte passive Absorberauskleidung, nämlich die bei **Abbildung 16** beschriebene. Hier wurde - im Unterschied zu den beiden vorgenannten Ausführungsbeispielen - die Abschlußimpedanz nicht aus analytisch hergeleiteten Näherungen gewonnen, sondern durch Interpolation von Meßwerten, wie dies oben beschrieben wurde. Da bei einer solchen Vorgehensweise die Beschränkungen einer analytischen Näherung entfallen, kommt die erzielte Dämpfung näher an den Optimalwert heran.

Neben den in den Beispielen demonstrierten Verbesserungen der Schalldämpfung besitzt die Erfindung noch weitere technische Vorteile gegenüber dem Stand der Technik, welche nachfolgend aufgezählt werden.

Die Realisierung des aktiven Subsystems ist eine elektronische Steueraufgabe statt - wie beim aktiven Schalldämpfer - eine Regelaufgabe. Darin wird ein Vorteil gesehen, da erfahrungsgemäß Steueraufgaben leichter zu lösen sind als Regelaufgaben. Gleichwohl können dem aktiven Subsystem nach der Erfindung regeltechnische Ergänzungen beigelegt werden, welche ein "Nachfahren" von Änderungen der betriebstechnischen Parameter erlauben.

Die Steuergröße ist bei der Erfindung der Gesamtdruck am Meßort und nicht - wie beim aktiven Schalldämpfer - der Schalldruck der einfallenden Welle, der erst aus dem gemessenen Schalldruck mit aufwendigen Algorithmen zurückgewonnen werden muß.

Die Anwendung des erfindungsgemäßen Schalldämpfers ist - im Gegensatz zum aktiven Schalldämpfer - unabhängig von der Schallfeldverteilung im Dämpferkanal. Dies ist wichtig, da die Schalldruckverteilung in technischen Anlagen weder sicher voraussagbar noch konstant zu halten ist. Der erfindungsgemäße Schalldämpfer kann deshalb unabhängig von der Lärmquelle, bei welcher er eingesetzt werden soll, entwickelt und dimensioniert werden, während aktive Schalldämpfer auf die jeweilige Lärmquelle angepaßt werden müssen.

Die akustische Feldimpedanz, auf welche der Lautsprecher des aktiven Subsystems arbeitet, kann

durch entsprechende Wahl der Parameter des passiven Subsystems in weiten Bereichen eingestellt werden. Dies hat den Vorteil, daß relativ "harte" Lautsprecher benutzt werden können. Diese sind nämlich in der Regel billiger und im Betrieb robuster. Außerdem wird bei einer Realisierung des hybriden Absorbers in Serienschaltung der Schalldruckpegel am Lautsprecher - und damit die erforderlicher Elongation der Lautsprechermembrane - durch den vorgeschalteten passiven Absorber verringert.

Ein für die technische Anwendung wichtiger Vorteil der Erfindung besteht darin, daß die Komponenten des aktiven Subsystems nicht - wie beim aktiven Schalldämpfer - unmittelbar der Strömung exponiert sind. Der vorgeschaltete passive Absorber kann als Wärmedämmschicht bei heißen Gasströmungen benutzt werden, da poröse Faserabsorber in der Regel auch eine gute Wärmedämmung besitzen. Der vorgeschaltete passive Absorber kann bei der Erfindung auch die Funktion eines Schmutzfilters zusätzlich übernehmen.

Wichtig für die Anwendung in Strömungskanälen ist auch die Eigenschaft poröser passiver Absorbermaterialien, daß sie auf turbulente Druckschwankungen einen Gleichrichter-Effekt ausüben. Das heißt: die Felder der turbulenten Druckschwankungen bauen sich in einer Absorberschicht rascher ab als die Felder der Schallwelle, da bei den hier hauptsächlich interessierenden tiefen Frequenzen die charakteristischen Durchmesser der turbulenten Druckschwankungen sehr viel kleiner sind als die Schallwellenlängen. Das beim aktiven Schalldämpfer auftretende Problem, akustische und turbulente Druckschwankungen voneinander separieren zu müssen, entfällt bei der Erfindung weitgehend.

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Schalldämpfers im Vergleich zum aktiven Schalldämpfer wird darin gesehen, daß bei einem Ausfall des aktiven Subsystems (bei Wartung oder bei Störung) der passive Absorber eine gewisse verbleibende Schalldämpfung sicherstellen kann.

Ein anderer Vorteil des erfindungsgemäßen Schalldämpfers gegenüber dem aktiven Schalldämpfer besteht darin, daß der Übergang auf andere Kanalquerschnitte im wesentlichen durch eine Änderung der Konstanten U_{wp} berücksichtigt werden kann und daß nicht - wie beim aktiven Schalldämpfer - neue Algorithmen der Regelung und neue Anordnungen der Lautsprecher entwickelt werden müssen.

Schließlich ist es ein bei der Planung und Dimensionierung eines erfindungsgemäßen Schalldämpfers außerordentlich hilfreicher Vorteil, daß sich die einzelnen Auslegungsschritte in Standardaufgaben (wie Impedanzmessung, Bestimmung von Wandlerkonstanten, Entwurf von Steuerschaltungen etc.) zerlegen lassen, während beim aktiven Schalldämpfer praktisch nur am kompletten System experimentiert werden kann.

Daß andererseits die Erfindung keine naheliegende Weiterentwicklung bekannter technischer Lehren darstellt, erkennt man allein an den Funktionen, welche einer porösen Absorberschicht in einem erfindungsgemäßen Schalldämpfer zugeteilt werden. Eine solche Schicht bietet den Wärmeschutz für das aktive Subsystem; sie ist ein Schmutz- und Turbulenzfilter; sie erniedrigt den Schalldruckpegel am Ort des aktiven Subsystems infolge der inneren Ausbreitungsdämpfung im Absorbermaterial und macht dadurch Lautsprecher mit kleinerem Hub möglich; sie übernimmt die Aufgabe eines passiven Dämpfers bei hohen Frequenzen; sie gewährleistet eine Restdämpfung im Störfall des aktiven Subsystems; sie stellt als passiver Dämpfer die Dämpfung höherer Kanalmoden sicher; sie bewerkstelligt als Widerstandsgleichrichter einen Druckausgleich in Querrichtung bei ungleichförmig schwingenden Lautsprechermembranen.

Zusammenfassend ergeben sich also als Realisierungsmöglichkeiten der Erfindung:

Bezüglich der akustischen Grundformen:

- Serienschaltung des passiven und des aktiven Elements (vgl. Abb. 4)
- Parallelschaltung des passiven und des aktiven Elements (vgl. Abb. 5)
- Mischtypen hiervon (vgl. Abb. 20-22)

Bezüglich des aktiven Subsystems bestehend aus Signalaufnehmer (1), Signalformer (9) und Schallgeber (3) als elektroakustische Varianten bei entsprechender Ausbildung des Signalaufnehmers:

- Steuerung über Mikrofon oder Lautsprecher-Mikrofon (vgl. Abb. 3 und 23)
- Steuerung über Körperschall-Aufnehmer mit Mikrofon (vgl. Abb. 25)
- Regelung über Kanal-Mikrofone (vgl. Abb. 26)

Als elektroakustische Variante sei besonders die der Steuerung über Mikrofon nach Abb. 3 hervorgehoben, wobei der Quotient aus dem Flächenmittelwert der Schnelle der Lautsprechermembrane und dem Schalldruck vor derselben eine erfindungsgemäße akustische Abschlußimpedanz Z_b bildet, die im Fall der akustischen Serienschaltung des passiven Absorbers und des aktiven Subsystems gemäß der oben angegebenen Gleichung (7) und im Fall der akustischen Parallelschaltung des passiven Absorbers und des aktiven Subsystems durch eine Kombination der oben angegebenen Gleichungen (12) und (7) festgelegt wird.

10. Beschreibung der Abbildungen

- Abb.1: Rechteckiger Schalldämpfer mit lichter Kanalweite $H = 2h$ und Absorberauskleidung der Dicke d aus porösem Absorbermaterial mit längenbezogenem Strömungswiderstand Ξ , kanalseitig mit einer schalldurchlässigen Deckschicht.
- Abb.2: Kulissen-Schalldämpfer mit Kulissen der Dicke $D = 2d$ und Spaltweiten $H = 2h$.
- 5 Abb.3: Schemazeichnung des aktiven Subsystems mit Schallaufnehmer (1), Signalformer (2), Lautsprecher (3)
- Abb.4: Serienschaltung des passiven (1) und des aktiven (2) Subsystems.
- Abb.5: Parallelschaltung des passiven (1) und des aktiven (2) Subsystems.
- Abb.6: Lösung von Gl.(5); 1. Dämpfer-Mode.
- 10 Abb.7: Lösung von Gl.(5); 2. Dämpfer-Mode.
- Abb.8: Schalldämpfung in einem rechteckigen Schalldämpfer mit lichter Kanalweite $H = 2h$ mit einer Absorberauskleidung, deren Absorbertfunktion U den Wert $U = U_{wp}$ hat.
- Abb.9: Schalldämpfung in einem rechteckigen Schalldämpfer mit lichter Kanalweite $H = 2h$ bei optimaler Absorberauskleidung, bei hybrider Absorberauskleidung mit passivem Absorber der Dicke d aus poröser Absorberschicht mit Strömungswiderstand $R = \Xi d / Z_0$ und bei rein passiver Auskleidung.
- 15 Abb.10: Näherungen für Dämpfungskurven von rechteckigen Schalldämpfern mit lichter Kanalweite $H = 2h$ und Absorberauskleidung der Dicke d aus porösem Absorbermaterial mit längenbezogenem Strömungswiderstand Ξ , optimiert auf Breitbandigkeit [1].
- 20 Abb. 11: Schalldämpfung mit einer passiven Absorberauskleidung aus sogenannten "Membransbsorbern", einer auf tiefe Frequenzen abgestimmten Resonator-Kombination.
- Abb.12: Schemazeichnung eines aktiven Schalldämpfers mit Steuermikrofon (1), Signalformer (2), Antischall-Lautsprechern (3)
- Abb.13: Schemazeichnung eines aktiven Schalldämpfers mit adaptiver Regelung ; Steuermikrofon (1), Signalformer (2), Antischall-Lautsprecher (3), Korrektur-Mikrofon (4), Regler (5).
- 25 Abb.14: Ortskurve der Abschlußimpedanz Z_b einer Absorberschicht der Dicke d mit $d/h = 0,5$ mit normiertem Strömungswiderstand $R = 0,5$
- Abb.15: Ortskurve der Abschlußimpedanz Z_b einer Absorberschicht der Dicke d mit $d/h = 0,5$ mit normiertem Strömungswiderstand $R = 1,0$ abgedeckt mit einer Folie mit $m_p = 1$
- 30 Abb.16: Ortskurve der Abschlußimpedanz Z_b einer Absorberschicht der Dicke d mit $d/h = 0,5$ mit normiertem Strömungswiderstand $R = 3,5$ eines passiven Breitband-Absorbers.
- Abb.17: Ortskurve der Abschlußimpedanz Z_b einer Luftschicht der Dicke d mit $d/h = 0,5$ abgedeckt mit einem normierten Strömungswiderstand $R_s = 2,0$ und einer Folie mit $m_p = 1,0$.
- 35 Abb.18: Serienschaltung des passiven (1) und des aktiven (2) Subsystems, mit einer Lautsprecherbox (3).
Angedeutet sind die Abschlußimpedanz Z_b und die Eingangsimpedanz der Box Z_e
- Abb.19: Ortskurve der Membranimpedanz Z_m .
- 40 Abb.20: Kombination einer Serienschaltung (1) mit einer Parallelschaltung (2) der passiven und der aktiven Subsysteme.
- Abb.21: Kombination einer Serienschaltung (1) mit einer Parallelschaltung (2) mit einem gemeinsamen aktiven Subsystem.
- Abb.22: Kombination einer Serienschaltung (1) mit einer Parallelschaltung (2) mit einem gemeinsamen aktiven Subsystem unter Ausnutzung beider Membranseiten des Lautsprechers.
- 45 Abb.23: Schemazeichnung der Funktionskomponenten des aktiven Subsystems mit Schallaufnehmer (1), Mikrofonverstärker (2), Signalformer (3), Leistungsverstärker (4), Lautsprecher (5)
- Abb.24: Hintereinander angeordnete hybride Absorber (1) mit einem aktiven Subsystem bestehend aus einem Leitelement (2) und aus einer Keffenschaltung von Abschwächern und Phasendreher zur Nachbildung der Pegel- und Phasenänderung der Schallwelle im Dämpferkanal (4).
- 50 Abb.25: Serienschaltung eines passiven (1) und eines aktiven (2) Subsystems, welches das Verhältnis des Schalldrucks vom Mikrofon (3) und der Schnelle vom Körperschallaufnehmer (4) auf das geforderte Verhältnis der Abschlußimpedanz regelt.
- Abb.26: Serienschaltung eines passiven (1) und eines aktiven (2) Subsystems, welches die Differenz der Schallpegel an zwei hintereinander angeordneten Mikrofonen (3) im Dämpferkanal (4) auf einen maximalen Wert regelt.
- 55 Abb.27: Dämpfungskurven eines Schalldämpfers mit einem passiven Absorber und einer Abschlußimpedanz nach Abb.14;

- durchgezogen: hybrider Absorber;
gestrichelt: rein passiver Absorber.
- Abb.28: Dämpfungskurven eines Schalldämpfers mit einem passiven Absorber und einer Abschluß-Impedanz nach Abb.15;
- 5 durchgezogen: hybrider Absorber;
gestrichelt: rein passiver Absorber.
- Abb.29: Dämpfungskurven eines Schalldämpfers mit einem passiven Absorber und einer Abschluß-Impedanz nach Abb.16;
- 10 durchgezogen: hybrider Absorber;
gestrichelt: rein passiver Absorber.

11. Herangezogenes Schrifttum

- [1] MECHEL, F.P.
15 "Schalldämpfer"
in "Taschenbuch der Technischen Akustik", Edit. M. Heckl, H.A. Müller Springer-Verlag, Berlin, 1975
- [2] MECHEL, F.P.
"Schallabsorption"
in "Taschenbuch der Technischen Akustik", Edit. M. Heckl, H.A. Müller Springer-Verlag, Berlin, 1975
- 20 [3] MORSE, P.M. J. Acoust. Soc. Amer. 11(1939)205-210
"Transmission of sound inside pipes"
- [4] CREMER, L. Acustica, Beihefte 3(1953)249-263
"Theorie der Luftschalldämpfung im Rechteckkanal mit schluckender Wand und das sich dabei ergebende höchste Dämpfungsmaß"
- 25 [6] GERBER, O. Acustica, Beihefte 2(1953)264-270
"Experimentelle Untersuchungen zur Realisierung der theoretisch möglichen Höchstdämpfung der Schallausbreitung in einem rechteckigen Luftkanal mit schluckenden Wänden"
- [7] KURZE, U. Acustica 21(1969)74-85
"Schallausbreitung im Kanal mit periodischer Wandstruktur"
- 30 [8] KÖLTZSCH, P.
"Schallabsorbierende Kanäle"
in "Lärmbekämpfung", Edit. W. Schirmer Verlag Tribüne, Berlin, 1971 [9] ESCHE, V.
"Lüftungstechnische Anlagen und Schalldämpfer"
in "Taschenbuch Akustik", W. Fasold, W. Kraak, W. Schirmer Edit. VEB Verlag Technik, Berlin, 1984
- 35 [10] VDI-Richtlinie 2567
"Schallschutz durch Schalldämpfer"
- [11] FUCHS, H., u.a.
"Schallabsorbierendes Bauelement", DE-Pat. 3412432 (1984/1989)
"Schalldämpferbox", DE-Pat. 3504208 (1985/1989)
- 40 [12] LUEG, P. US Pat. Nr. 2,043,416; (1934/1936)
"Process of silencing sound oscillations"
LUEG, P. DRP Nr. 655 508; (1933/1937)
"Verfahren zur Dämpfung von Schallsschwingungen"
- [13] GUICKING, D. Fortschr. Akustik, DAGA '89(1989)23-36
45 "Aktiver Lärmschutz - Erfolge, Probleme und Perspektiven"
- [14] GUICKING, D.
"Active Noise and Vibration Control. Annotated Reference Bibliography"
3rd ed. 1988; III. Physik. Inst. Univ. Göttingen, 3400 Göttingen
- [15] MUNJAL, M.L., ERIKSSON, L.J.
50 J. Acoust. Soc. Amer. 86(1989)832-834
"Analysis of a hybrid noise control system for a duct"
- [16] MECHEL, F.P.
"Schallabsorber", Vol. I
Hirzel Verl., Stuttgart, 1989
- 55 [17] MECHEL, F.P. Fortschr. Akustik, DAGA '84(1984)31-52
"Schallabsorber"
- [18] LENK, A.
"Elektromechanische Systeme. Bd. 1: Systeme mit konzentrierten Parametern"

3. Aufl., VEB Verl.Technik, Berlin, 1975

[19] REICHARDT, W.

"Elektroakustik"

Teubner Verlagsges., Leipzig. 1971

[20] DE 34 25 450 AI

[21] DE 27 12 534 AI

Patentansprüche

1. Hybrider Schalldämpfer, bestehend aus einer passiven Absorberauskleidung und einem aktiven elektroakustischen Subsystem, **dadurch gekennzeichnet**, daß das ein Steuermikrofon und einen Lautsprecher aufweisende elektroakustische aktive Subsystem derart auf den mit ihm kombinierten passiven Absorber einwirkt, daß in dem so gebildeten hybriden Absorber die akustische Impedanz der Kanalseitigen Oberfläche der Absorberauskleidung eine Absorberfunktion U ergibt, welche in einem gewünschten Frequenzbereich den Wert der Absorberfunktion U_{wp} des Windungspunktes zwischen der ersten und der zweiten Schalldämpfer-Mode erreicht oder annähert.
2. Hybrider Schalldämpfer nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß bei überwiegend symmetrischen Schallfeldern im Schalldämpferkanal die Absorberfunktion U_{wp} am Windungspunkt zwischen der ersten und der zweiten symmetrischen Schalldämpfermode liegt, und daß bei überwiegend antisymmetrischen Schallfeldern im Schalldämpferkanal die Absorberfunktion U_{wp} am Windungspunkt zwischen der ersten und der zweiten antisymmetrischen Schalldämpfer-Mode liegt.
3. Hybrider Schalldämpfer nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß der passive Absorber aus an sich bekannten Komponenten wie poröse Absorbermaterialien, Luftschichten, Membranen, Folien, biegeelastischen Platten, Deckschichten mit Strömungswiderständen wie Vliese, Filze, Gewebe, Lochblechen etc., ferner aus akustischen Resonatoren an sich bekannter Art, wie Helmholtz-Resonatoren, Platten- und Folien-Resonatoren oder aus Kombinationen solcher Komponenten besteht.
4. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß der hybride Absorber die Auskleidung von Schalldämpferkanälen mit rechteckigem, rundem oder ringförmigen Querschnitt darstellt oder daß er sogenannte Kulissen in solchen Kanälen bildet.
5. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß das aktive Subsystem aus einem Steuermikrofon, gegebenenfalls mit einem Mikrofonverstärker, zur Messung des Schalldrucks vor dem Lautsprecher, aus eben diesem Lautsprecher, gegebenenfalls mit einem Leistungsverstärker, und aus einem dazwischen geschalteten elektronischen Signalformer besteht, welcher den Lautsprecher so steuert, daß der Quotient aus dem Flächenmittelwert der Schnelle der Lautsprechermembrane und dem Schalldruck vor derselben eine erfindungsgemäße akustische Abschlußimpedanz Z_b bildet.
6. Hybrider Schalldämpfer nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß der passive Absorber und das aktive Subsystem in akustischer Serienschaltung angeordnet sind.
7. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß der passive Absorber und das aktive Subsystem in akustischer Parallelschaltung angeordnet sind.
8. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß Kombinationen aus Serienschaltung und Parallelschaltung des passiven Absorbers und des aktiven Subsystems benutzt werden.
9. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Schnelle auf einer Seite der Lautsprechermembrane für die Abschlußimpedanz in Serienschaltung und die Schnelle auf der anderen Seite der Lautsprechermembrane für die Abschlußimpedanz in Parallelschaltung benutzt wird.
10. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß reziproke Lautsprecher im aktiven Subsystem verwendet werden und daß in zeitlich getakteten

Intervallen der Lautsprecher zur Messung des Schalldruckes an seiner Membrane dient.

- 5 11. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, daß zusätzlich zu dem Steuermikrofon für die Messung des Schalldruckes vor der Lautsprechermembrane ein Körperschallaufnehmer auf der Lautsprechermembrane aufgesetzt wird, welcher die Schnelle der Membrane mißt, und daß mit an sich bekannten elektronischen Regelkreisen der Quotient aus Schalldruck und Schnelle auf die erfindungsgemäße Abschlußimpedanz geregelt wird.
- 10 12. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß bei hybriden Absorberelementen, welche in Schallausbreitungsrichtung hintereinander angeordnet sind, die Ansteuerung der Lautsprecher der nachfolgenden Elemente durch elektronische Dämpfungsglieder und Phasendreher in der Weise abgeleitet wird, daß sie dem Pegelabfall und der Phasengeschwindigkeit der niedrigst gedämpften Dämpfermode im Dämpferkanal entspricht.
- 15 13. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß an hintereinander liegenden Stellen im Dämpferkanal mit Mikrofonen der Abfall des Schallpegels gemessen wird und daß durch an sich bekannte elektronische Regler die Abschlußimpedanz der Lautsprecher der verwendeten aktiven Subsysteme auf eine Maximierung des Pegelabfalls geregelt wird.
- 20 14. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Betriebstemperatur des Schalldämpfers gemessen wird und daß die Parameter des Signalformers des aktiven Subsystems mit an sich bekannten Regeltechniken unter Verwendung dieser Temperatur als Eingabegröße so geregelt werden, daß die in Anspruch 1 beschriebene Oberflächenimpedanz bei verschiedenen Betriebstemperaturen eingehalten wird.
- 25 15. Hybrider Schalldämpfer nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Strömungsgeschwindigkeit im Schalldämpferkanal gemessen wird und daß die Parameter des Signalformers des aktiven Subsystems mit an sich bekannten Regeltechniken unter Verwendung dieser Strömungsgeschwindigkeit als Eingabegröße und der bei der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit gültigen Absorberfunktion U_{wp} im Windungspunkt als Systemgröße so geregelt werden, daß die in Anspruch 1 beschriebene Oberflächenimpedanz bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten eingehalten wird.
- 30 16. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Signalformer des aktiven Subsystems in elektronischer Analogtechnik oder in elektronischer Digitaltechnik oder in Hybridtechnik aus analogen und digitalen Komponenten aufgebaut ist.
- 35 17. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, daß der passive Absorber als wärmedämmende Schicht ausgebildet ist.
- 40 18. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, daß der passive Absorber durch Deckschichten auf seiner Vorderseite gegen das Eindringen von Schmutz und/oder Feuchtigkeit geschützt ist und daß diese Deckschichten in die akustischen Charakteristiken des passiven Absorbers und in die Dimensionierung des Signalformers des aktiven Subsystems einbezogen sind.
- 45 19. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, daß die längenspezifischen Strömungswiderstände poröser Absorberschichten und/oder die Strömungswiderstände von Deckschichten des passiven Absorbers so gewählt werden, daß in einem vor der Lautsprechermembrane angeordneten Luftspalt ein Querausgleich des Schalldruckes bei einer ungleichmäßigen Schwingamplitude des Lautsprechers über seine Oberfläche erfolgt.
- 50 20. Hybrider Schalldämpfer nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, daß der passive Absorber nach an sich bekannten Regeln derart dimensioniert wird, daß bei einem Ausfall des aktiven Subsystems der Schalldämpfer eine gewisse Restdämpfung besitzt.
- 55

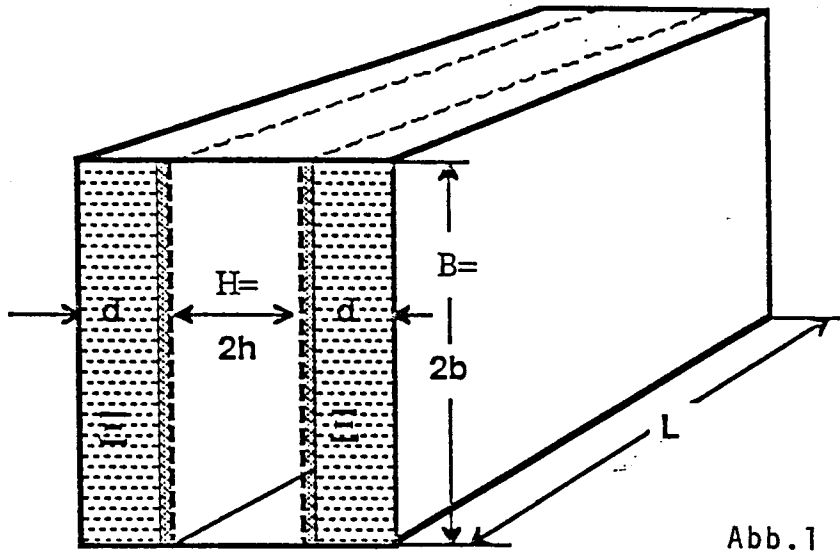


Abb.1

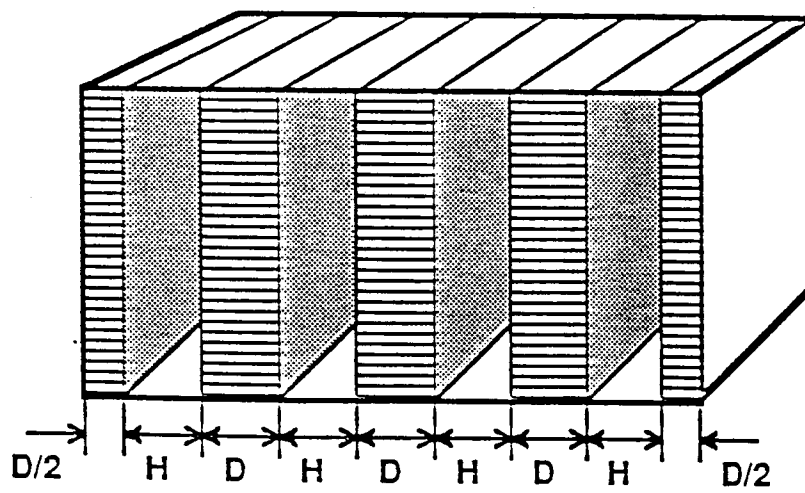


Abb.2

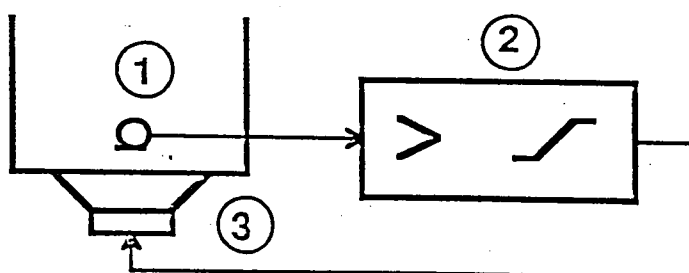


Abb. 3

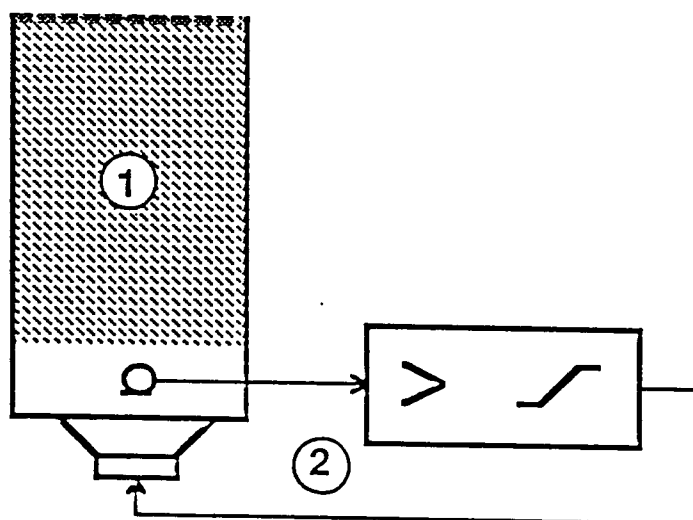


Abb. 4

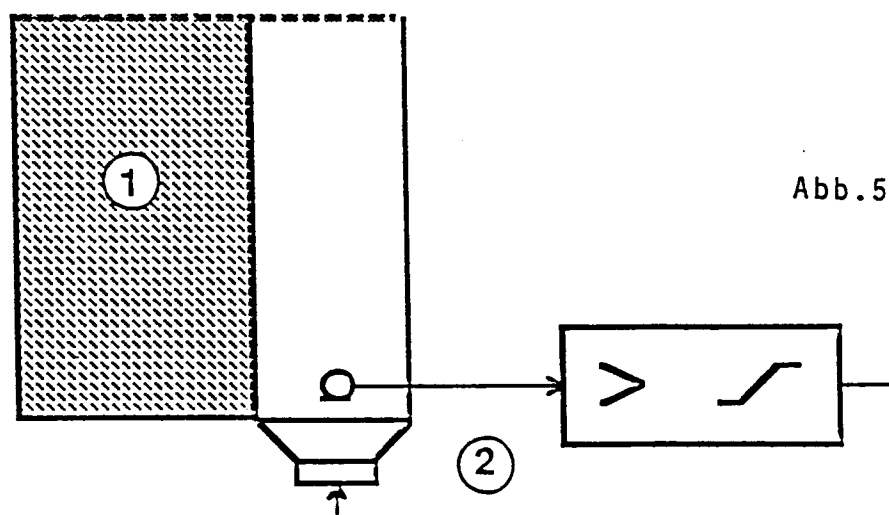


Abb. 5

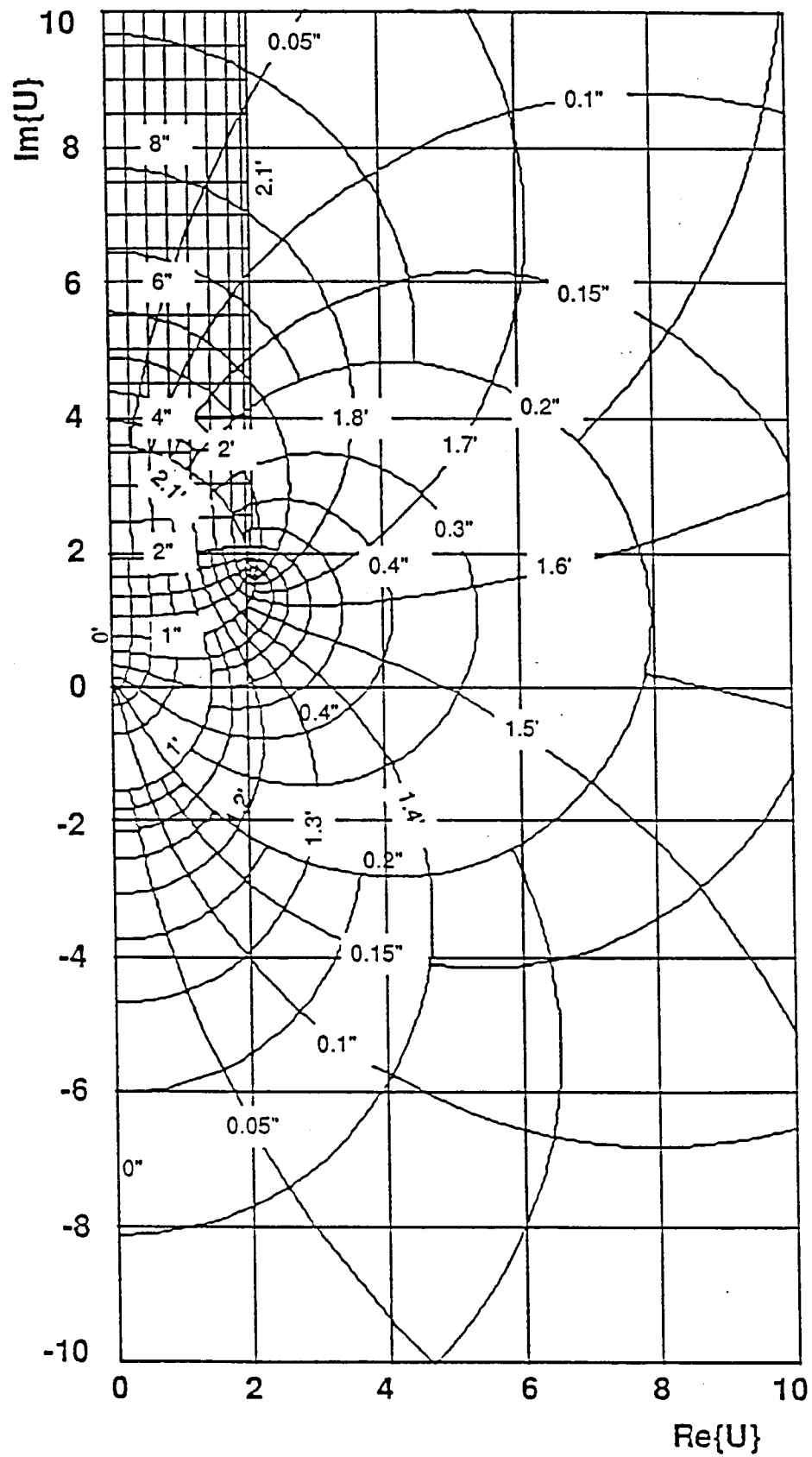


Abb. 6

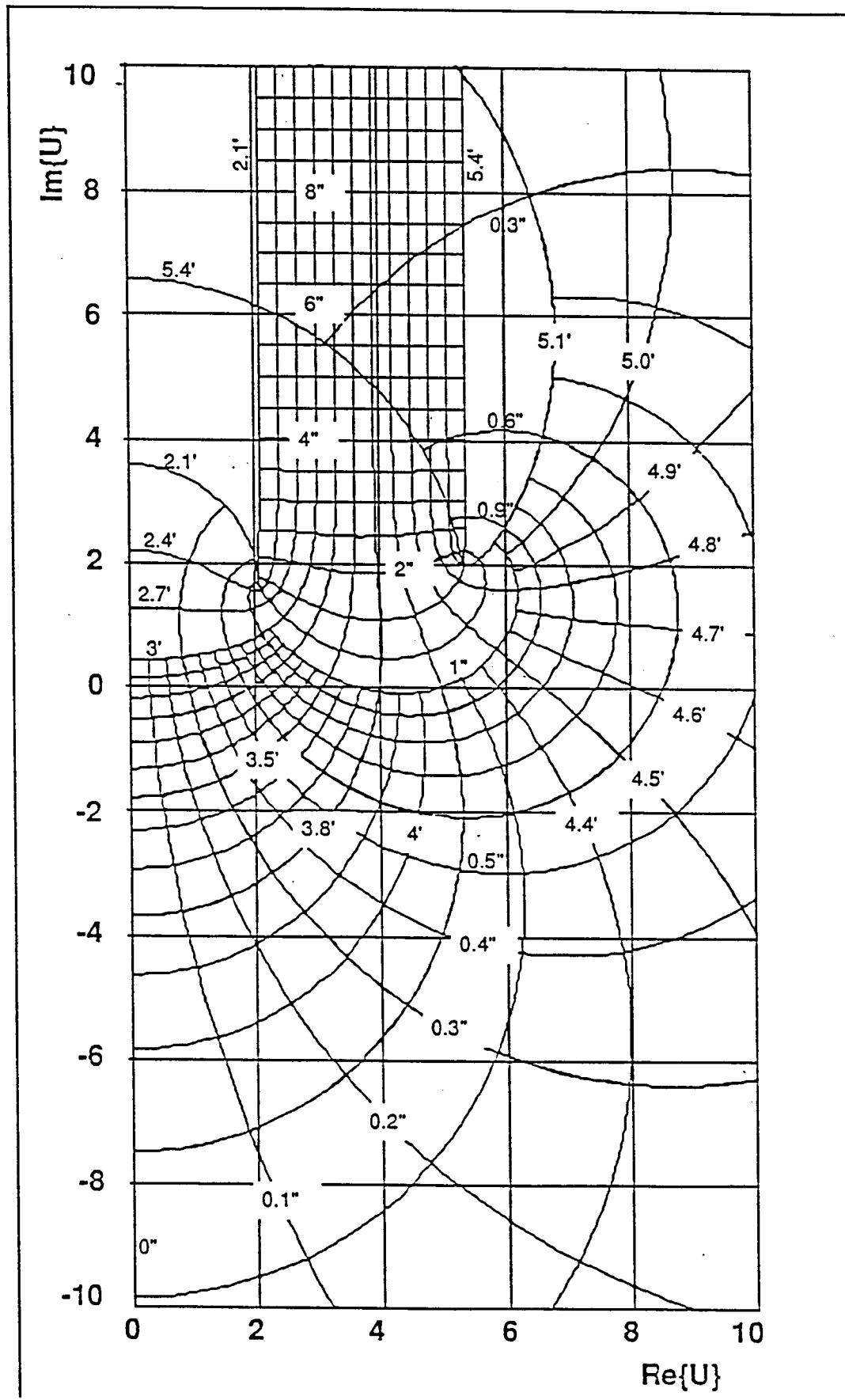


Abb. 7

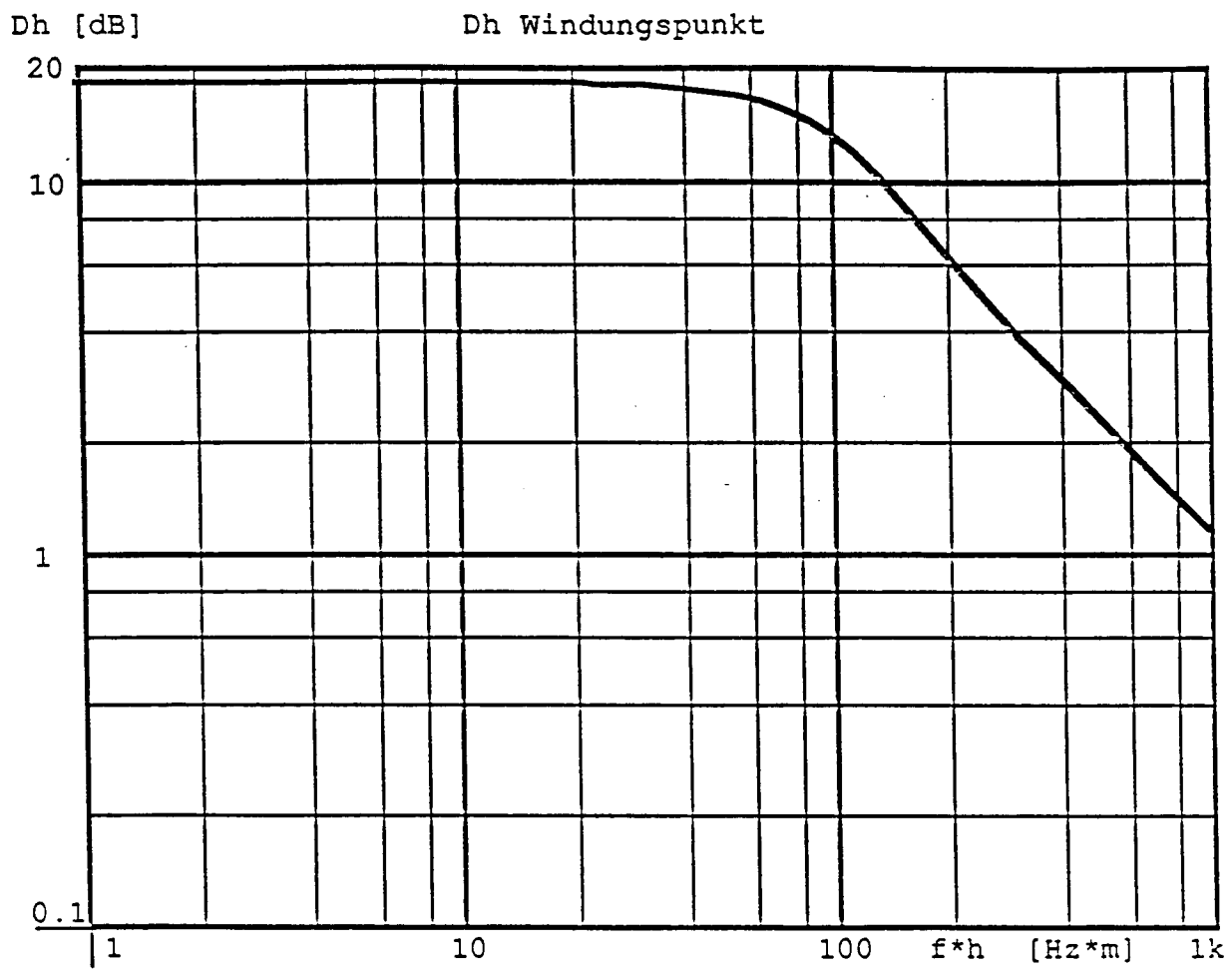


Abb.8

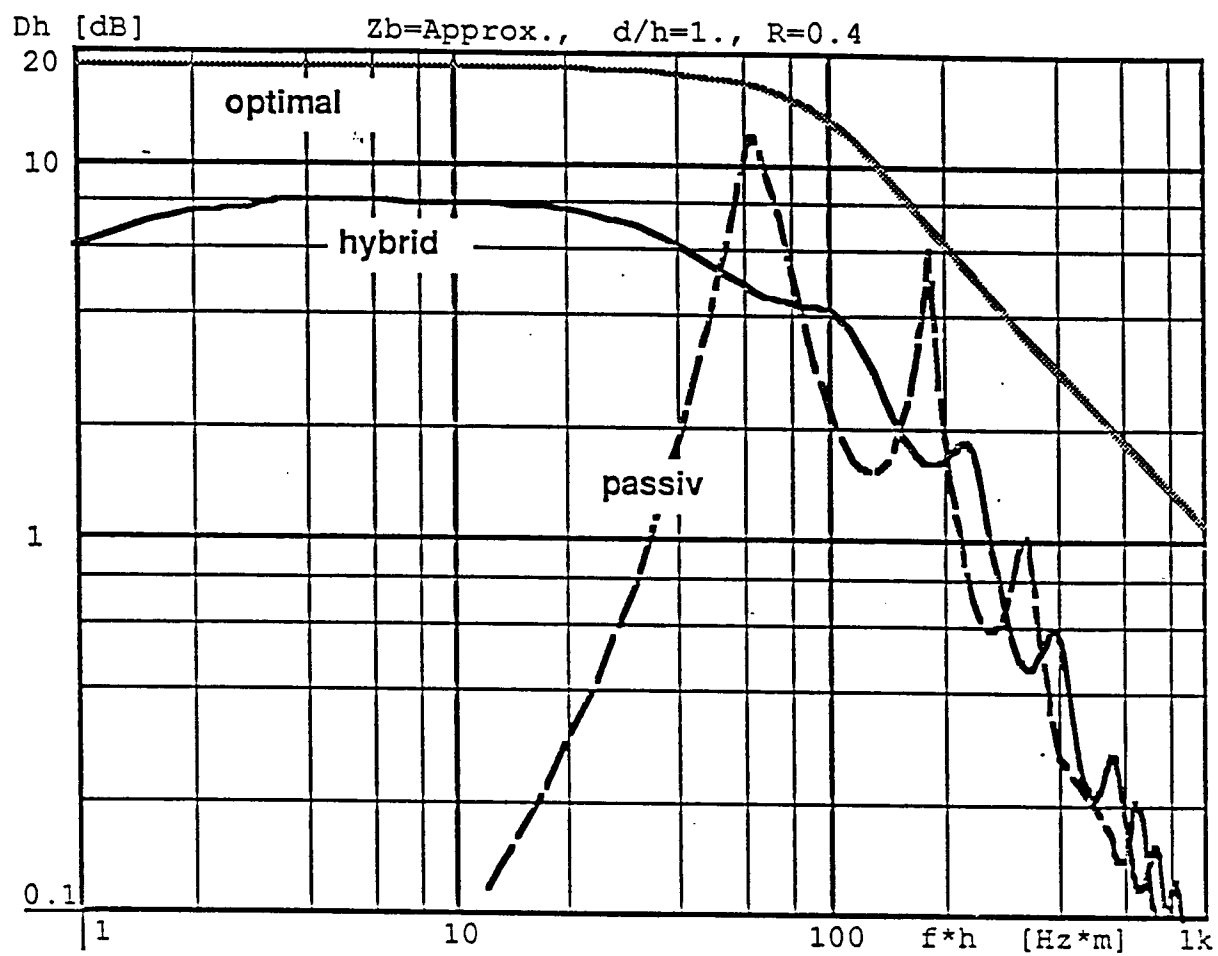


Abb. 9

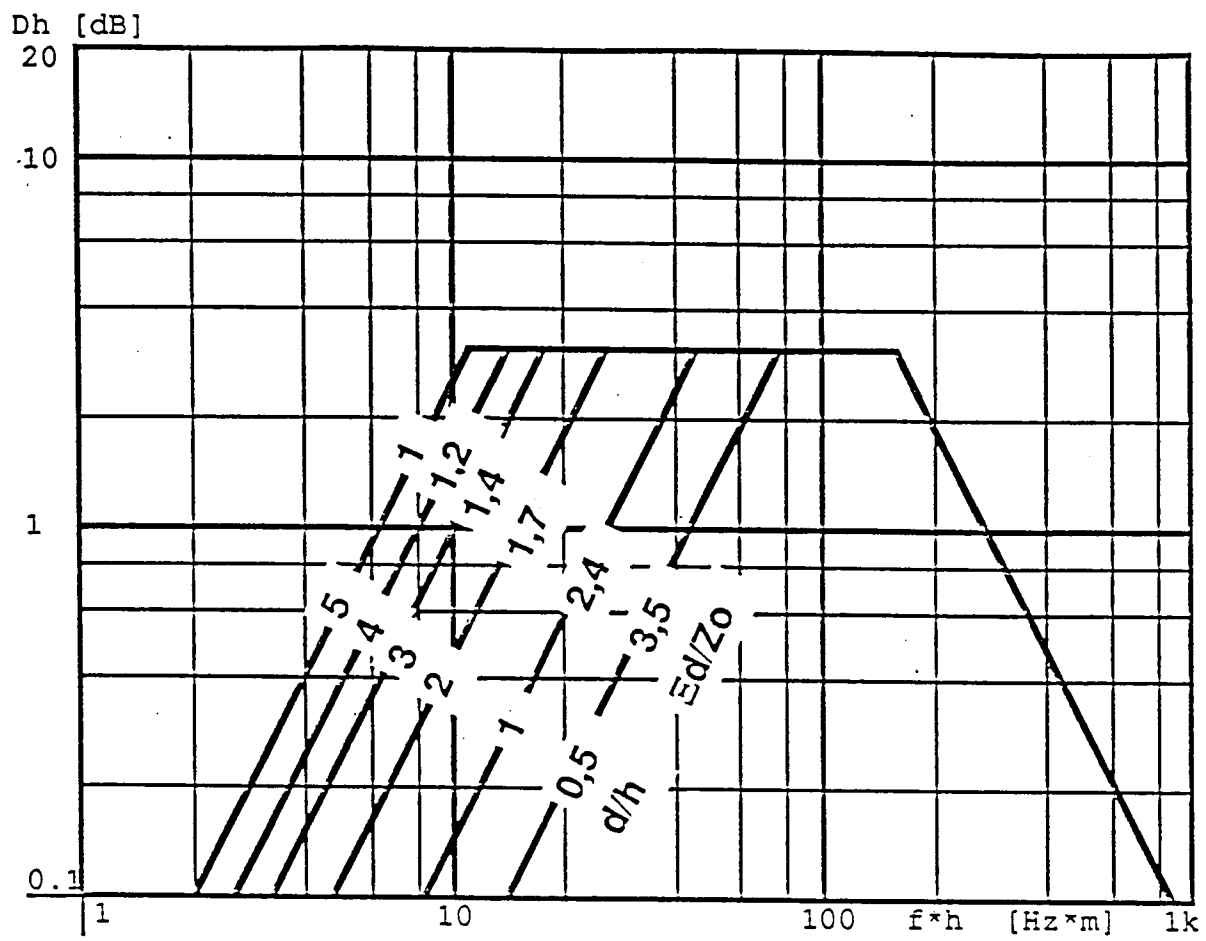


Abb.10

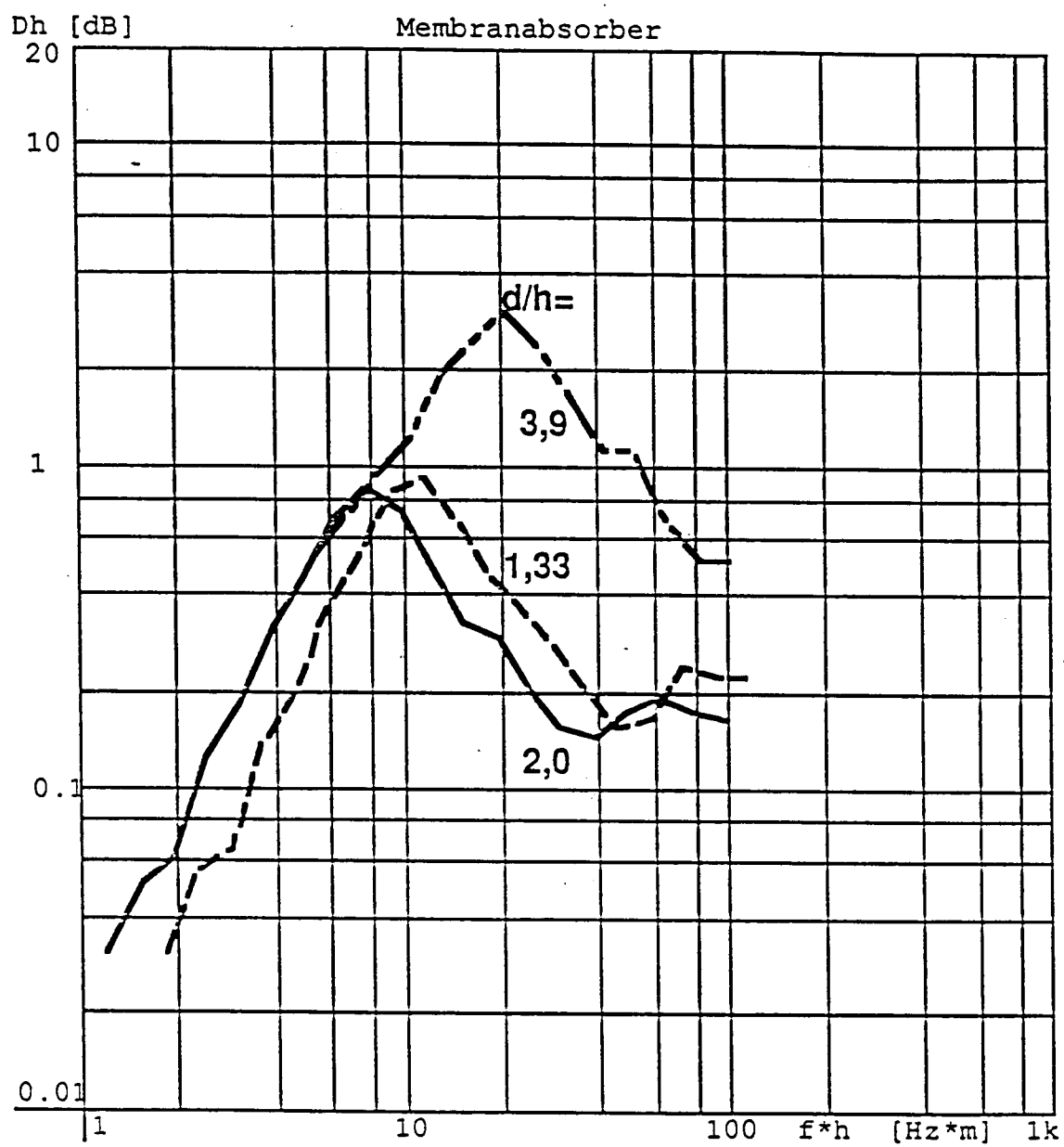


Abb.11

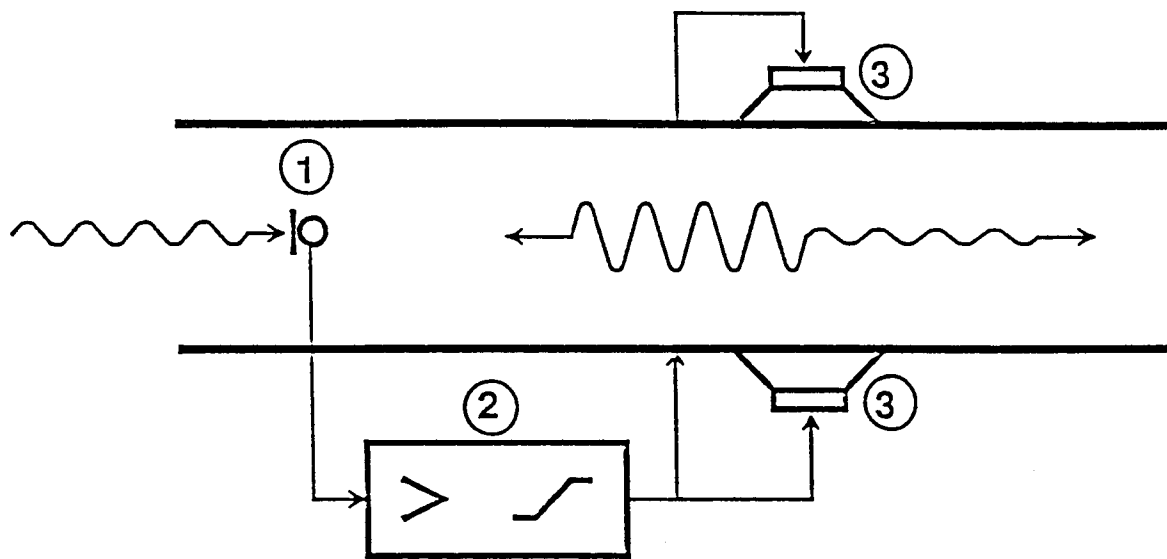


Abb. 12

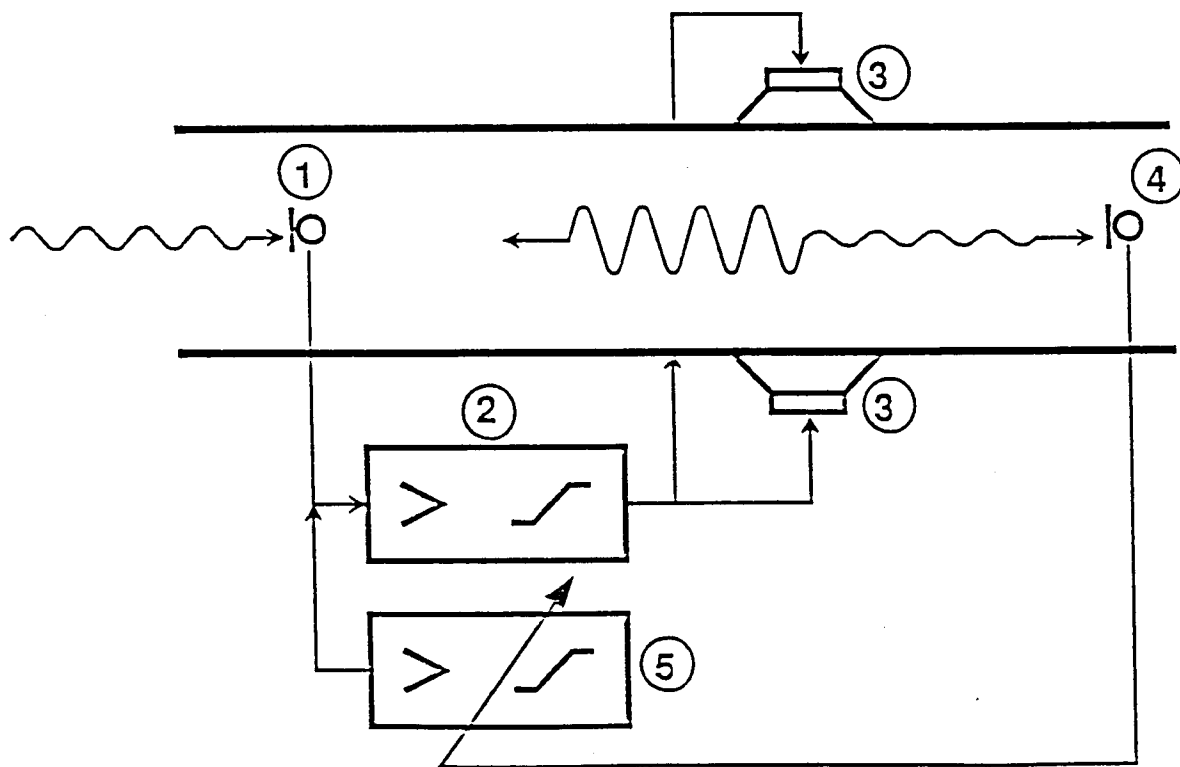


Abb. 13

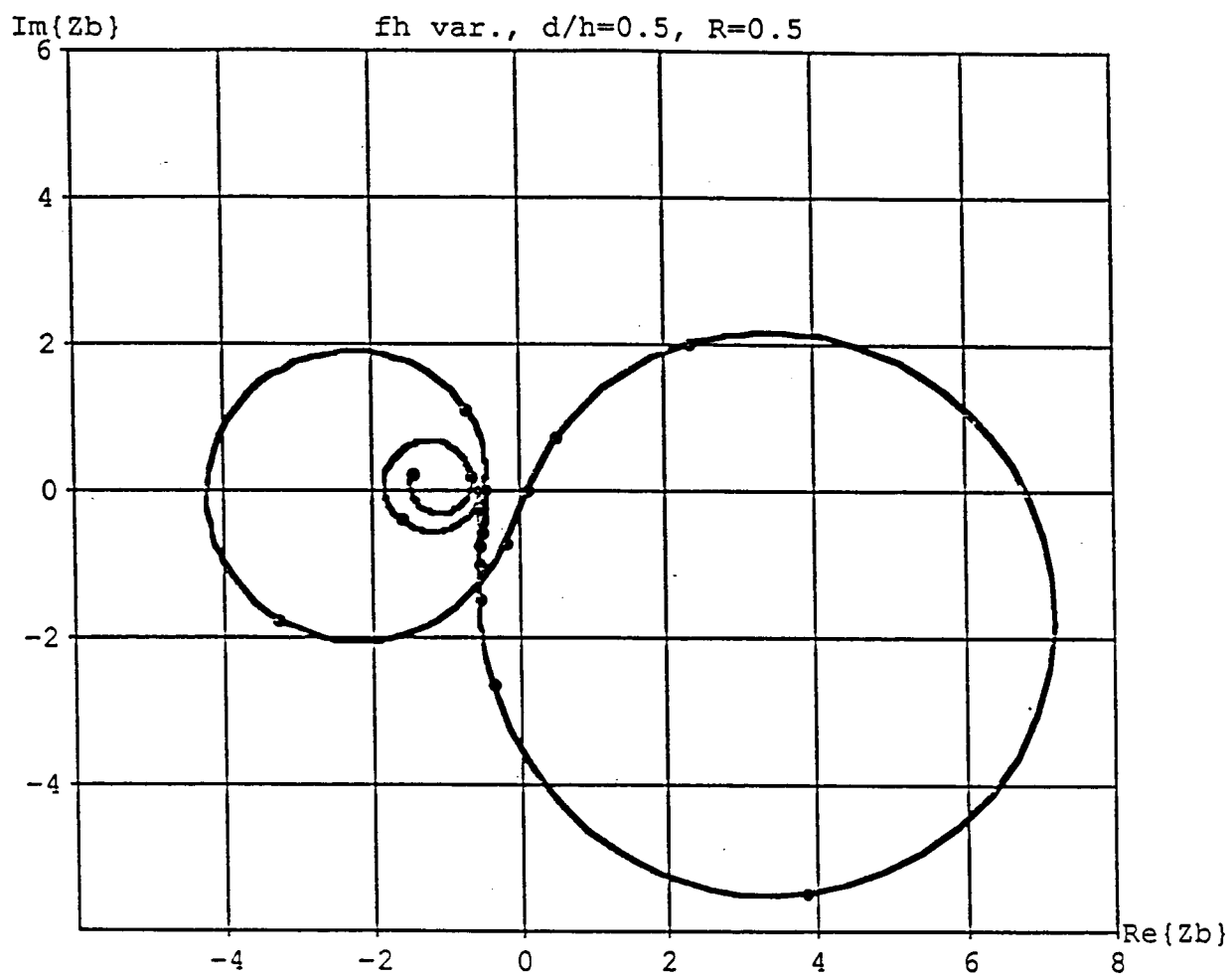


Abb.14

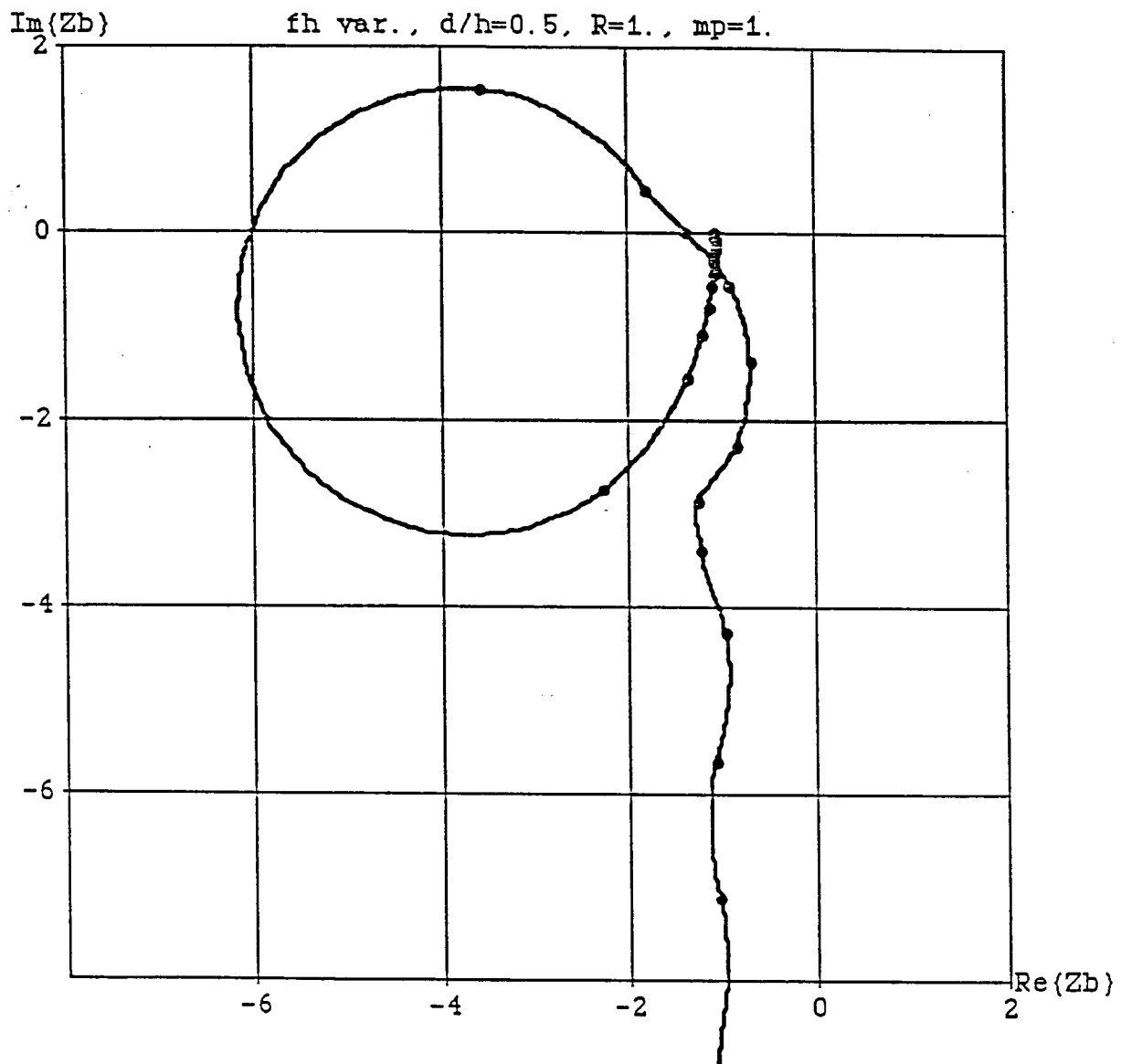


Abb.15

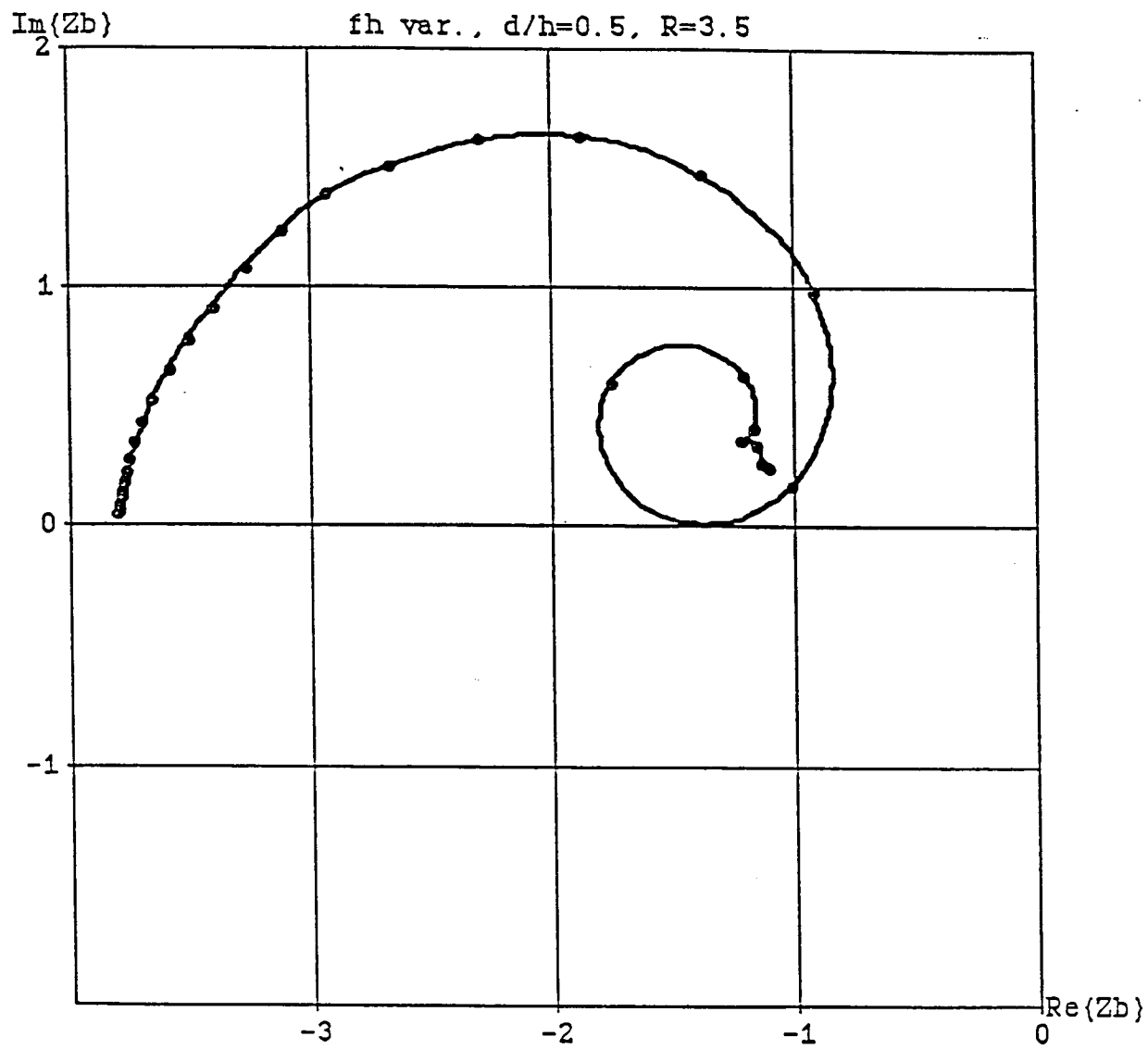


Abb.16

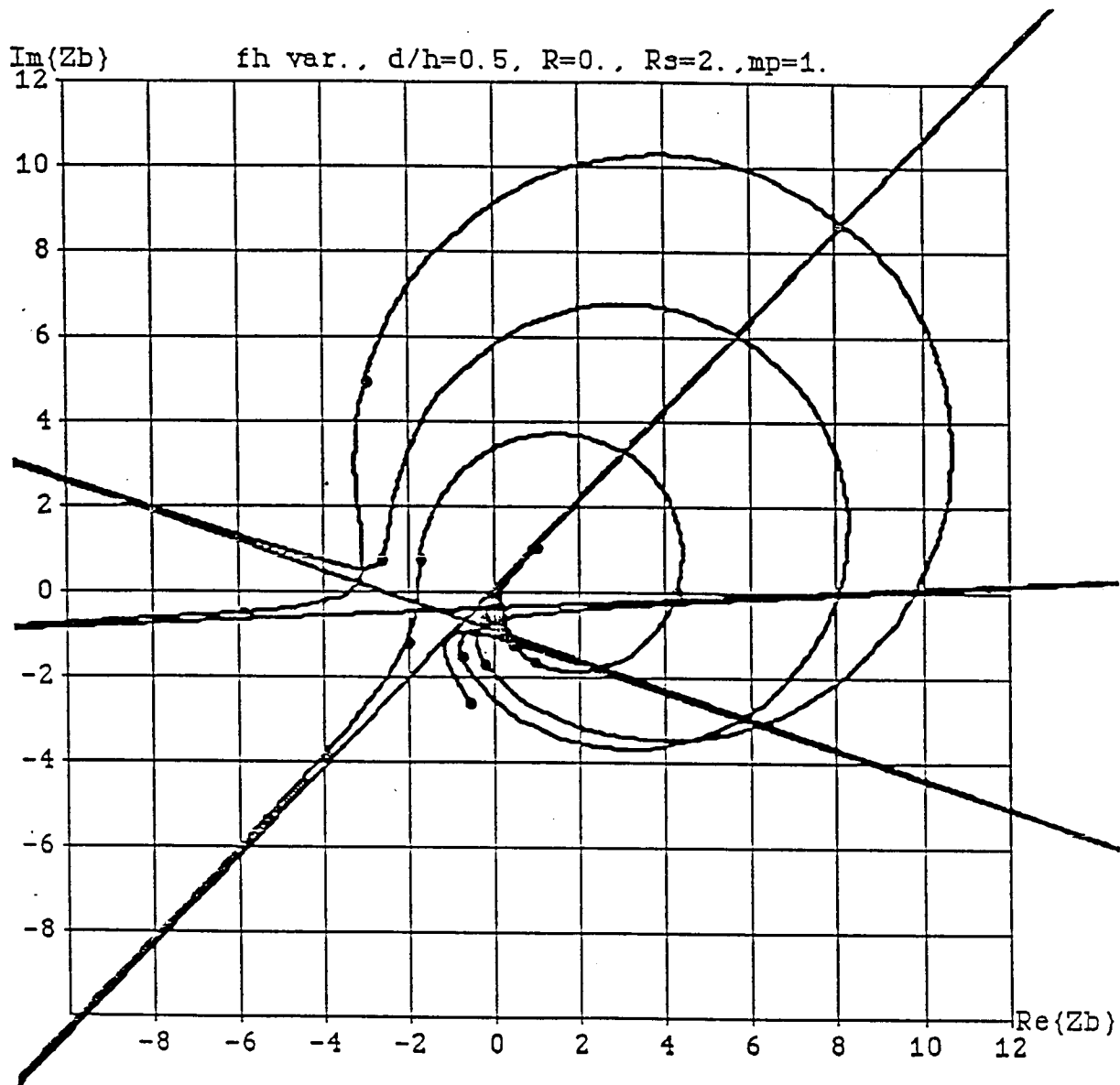


Abb.17

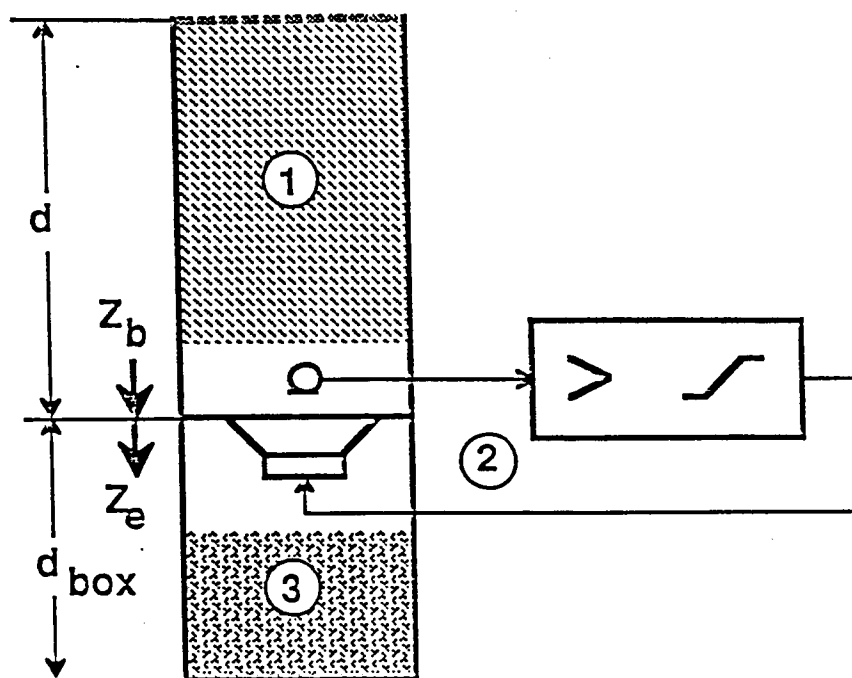


Abb.18

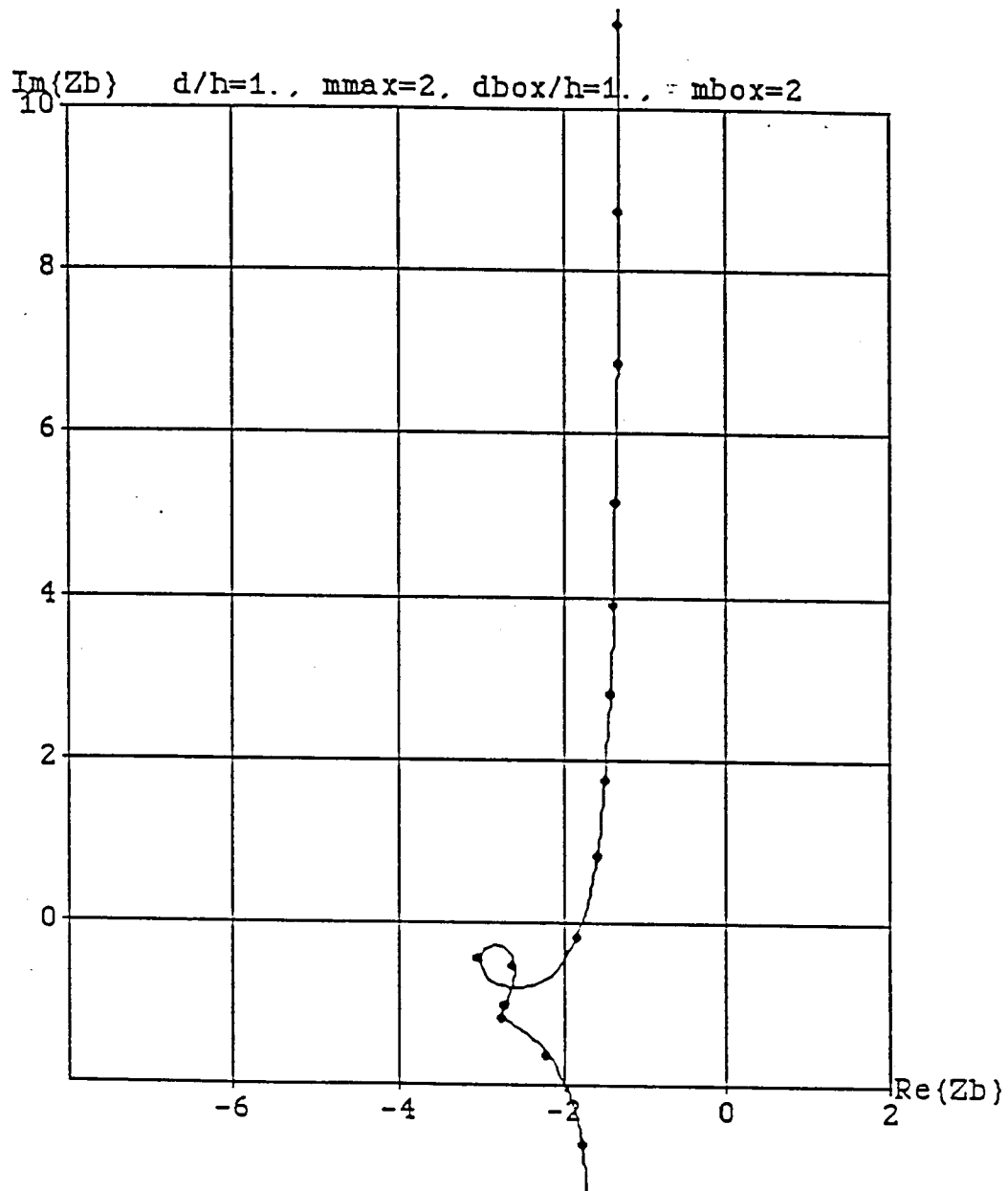


Abb. 19

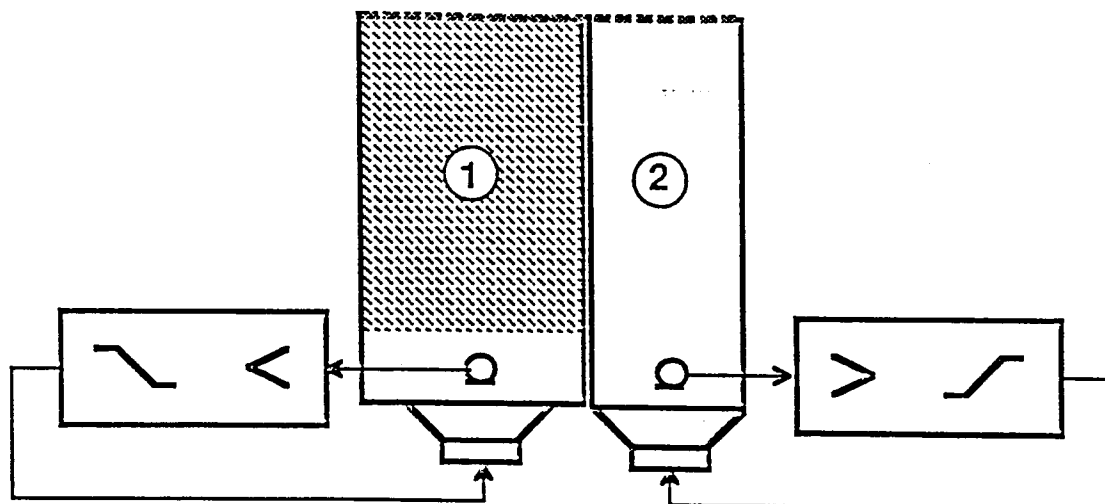


Abb. 20

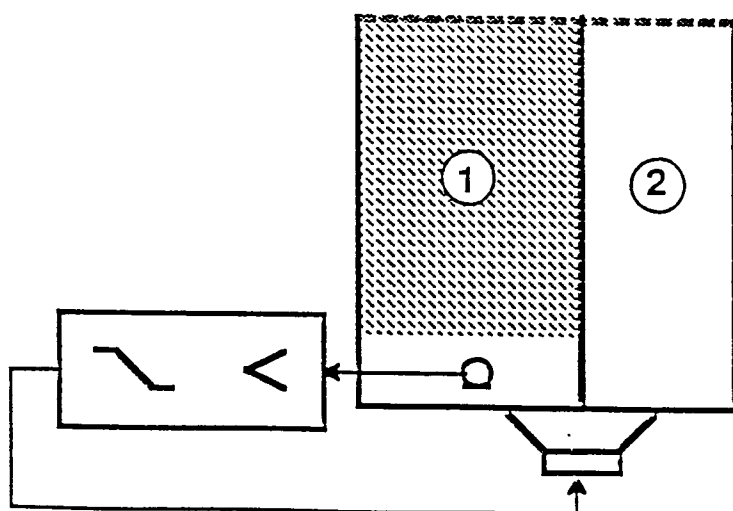


Abb. 21

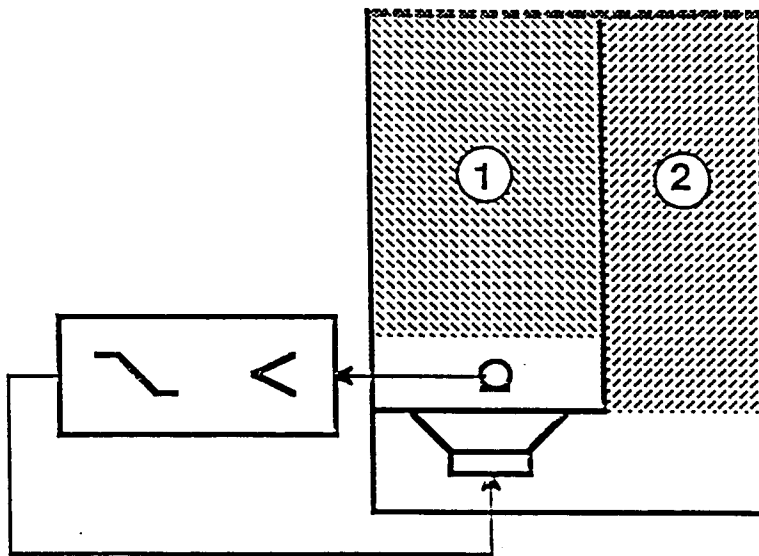


Abb. 22

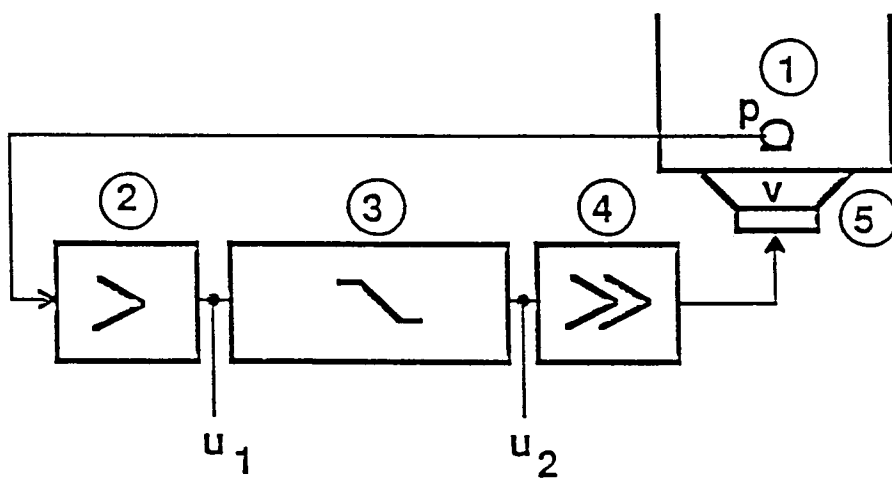


Abb. 23

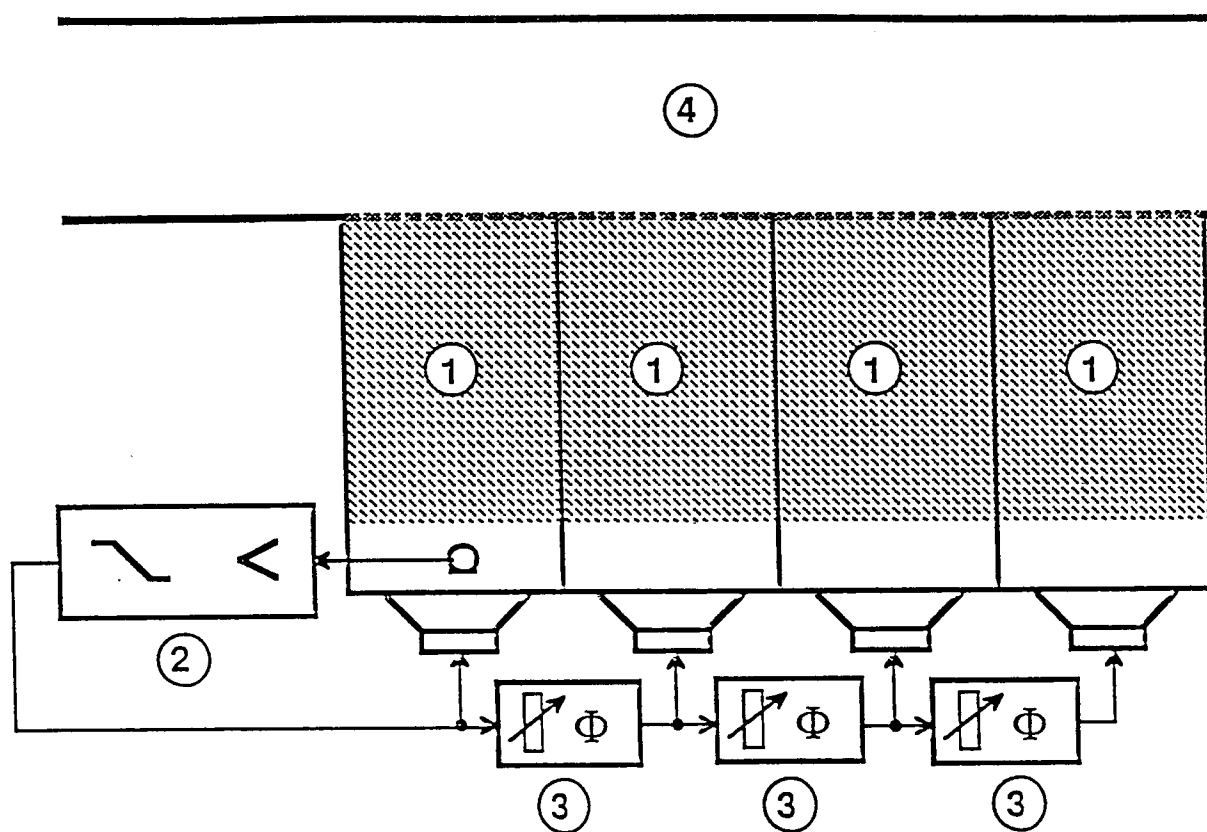


Abb. 24

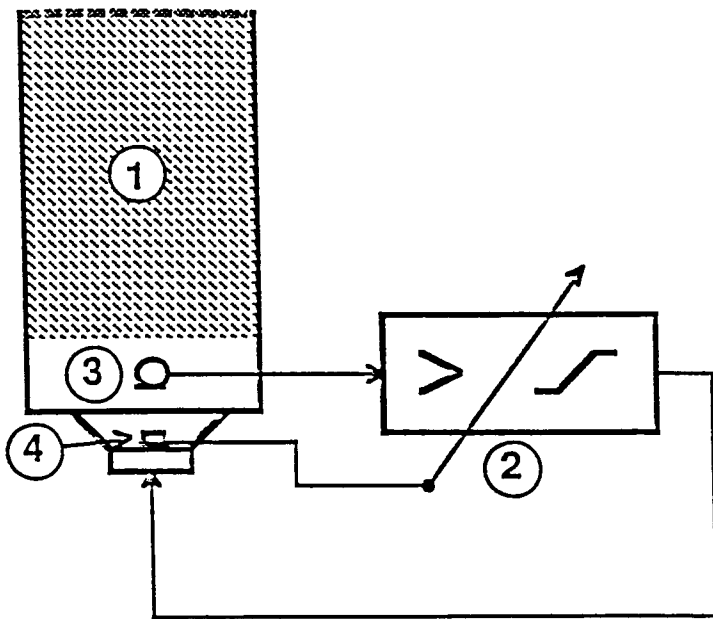


Abb. 25

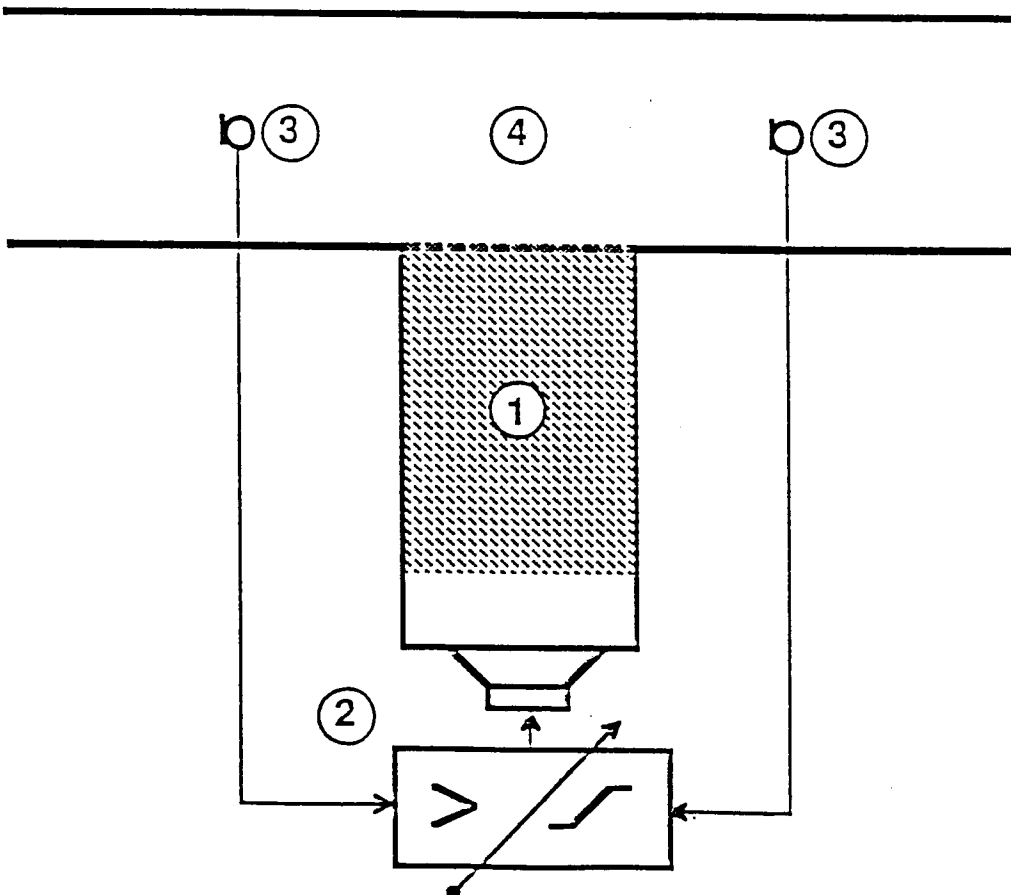


Abb. 26

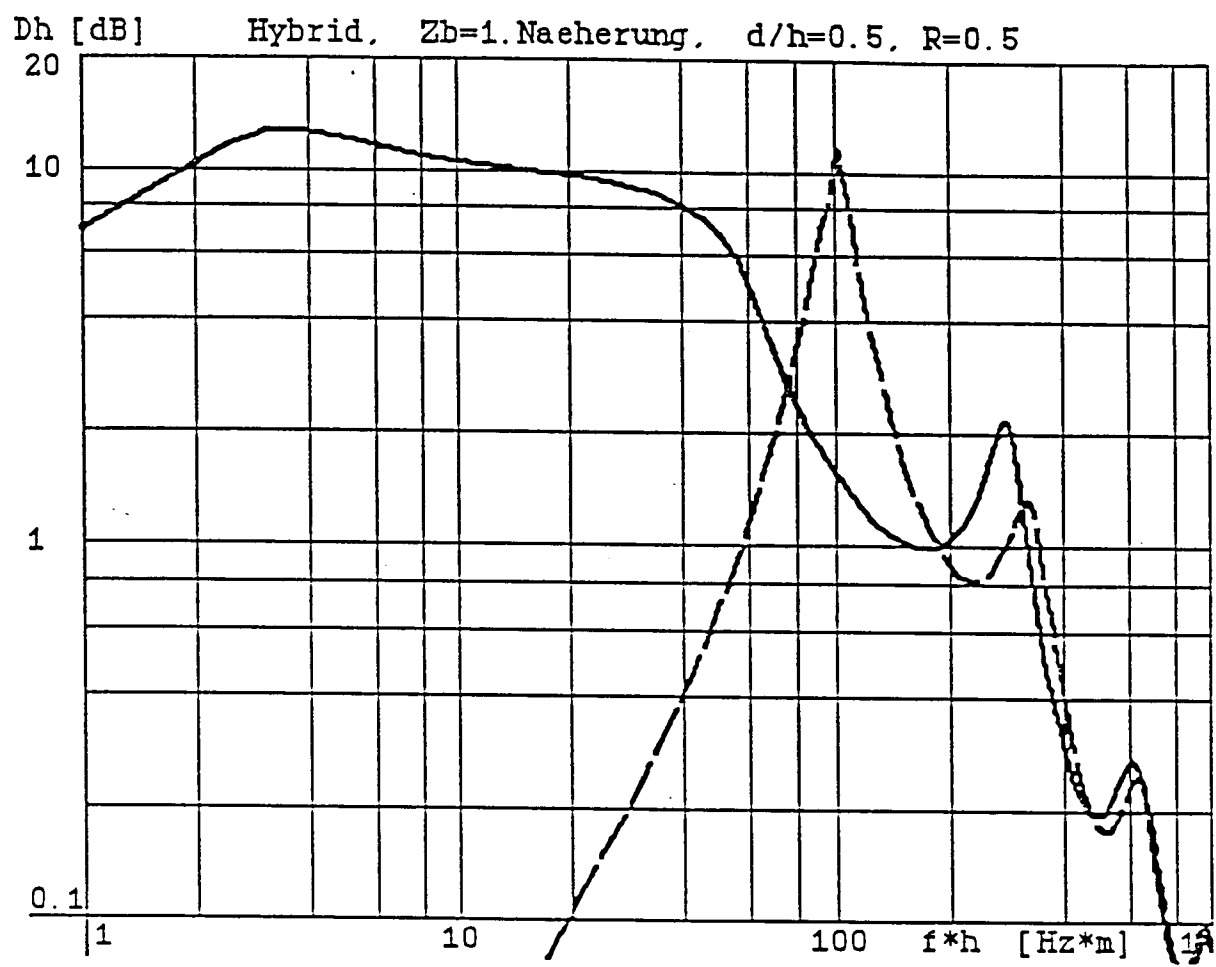


Abb. 27

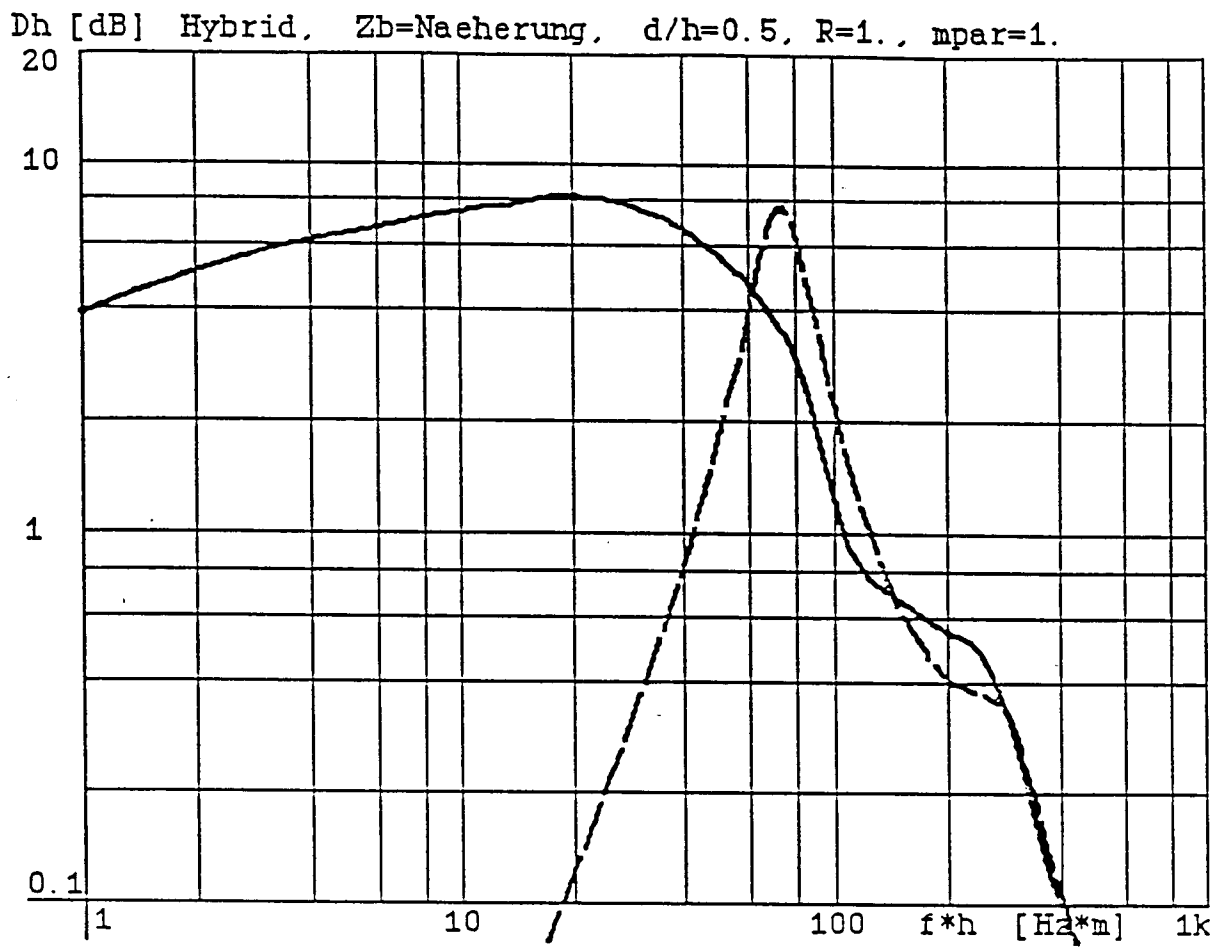


Abb. 28

Dh [dB] Hybrid. Zb=Naeherung, d/h=0.5, R=3.5, mpar=1.

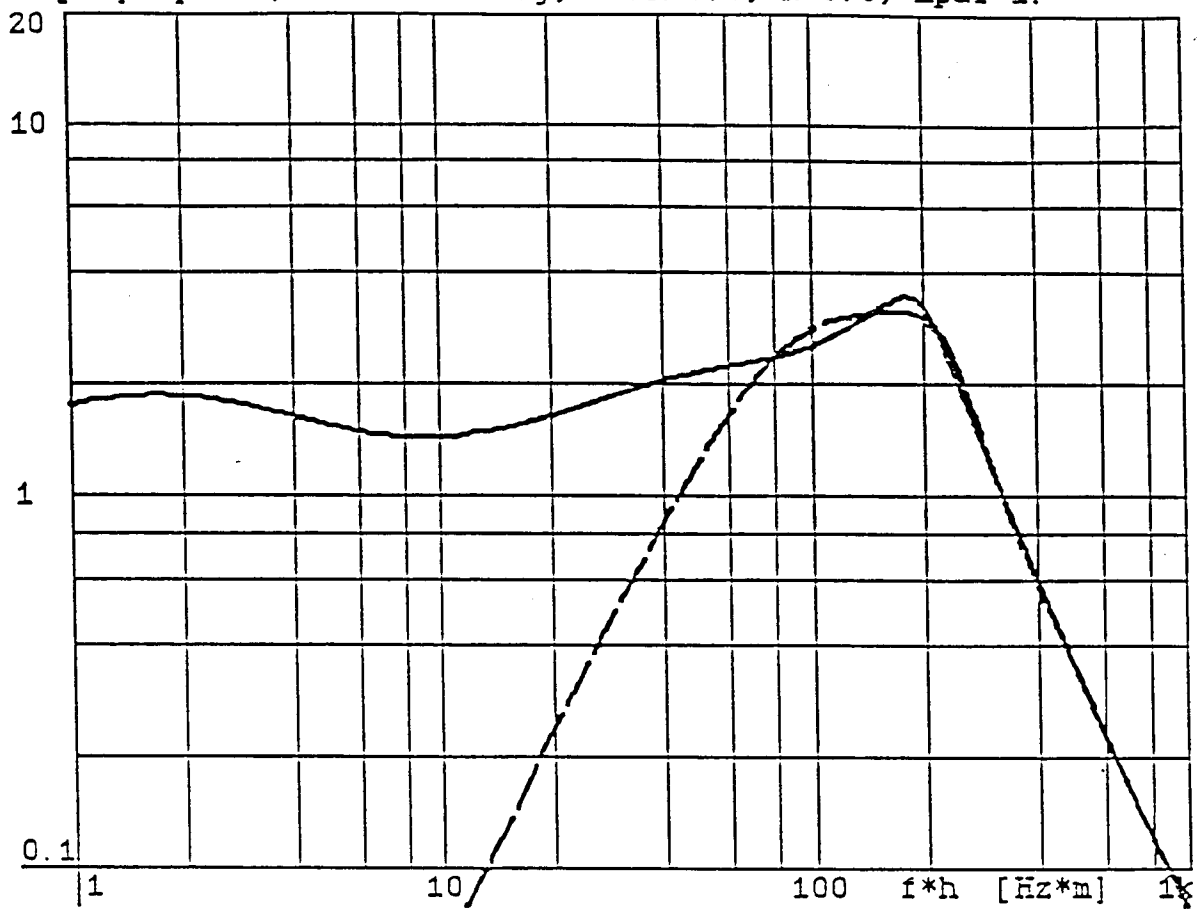


Abb.29