

⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Patentschrift
⑪ DE 27 25 346 C 3

⑤① Int. Cl. 3:
H 04 R 1/20

⑲	Aktenzeichen:	P 27 25 346.9-31
⑳	Anmeldetag:	4. 6. 77
㉑	Offenlegungstag:	7. 12. 78
㉒	Bekanntmachungstag:	7. 8. 80
㉓	Veröffentlichungstag:	14. 5. 81

⑦③ Patentinhaber:
Manger, Josef Wilhelm, 8725 Arnstein, DE

⑦② Erfinder:
gleich Patentinhaber

⑤⑤ Entgegenhaltungen:
US 33 93 764
Z: Audio, 25. year, Januar 1972, S. 32, 34 u. 73;

⑤④ Lautsprecher

DE 27 25 346 C 3

DE 27 25 346 C 3

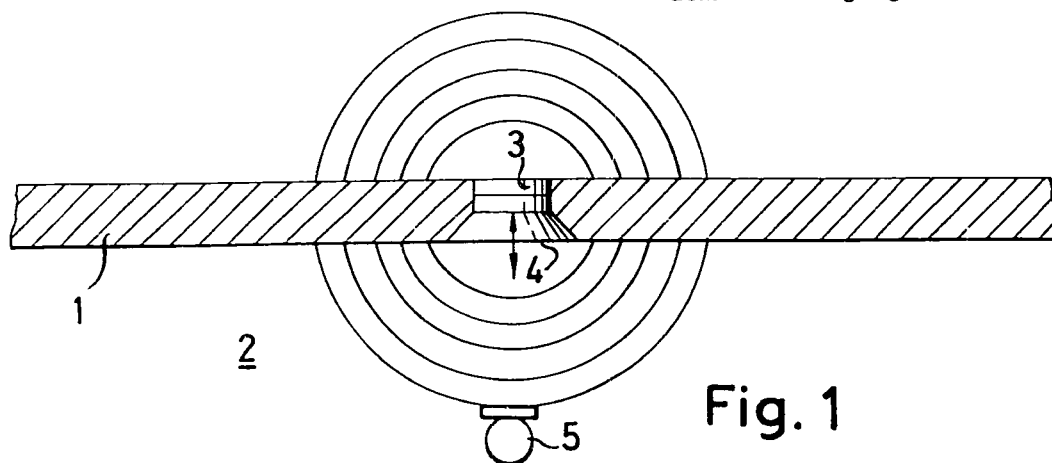


Fig. 1

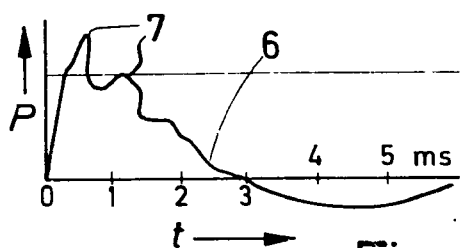


Fig. 2

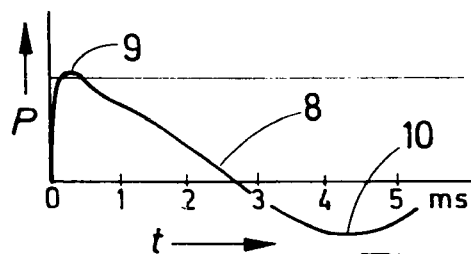


Fig. 3

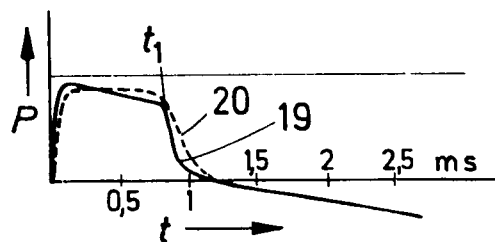


Fig. 5

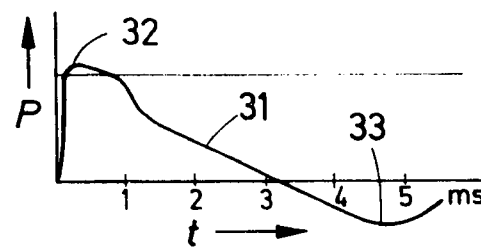


Fig. 7

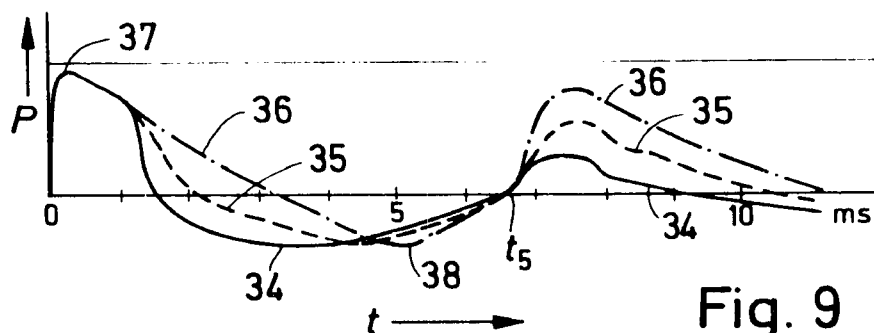


Fig. 9

Patentansprüche:

1. Lautsprecher mit wenigstens zwei gleichartigen elektroakustischen Wandlern, die zwecks gleichphasiger elektrischer Anregung in der Vorderwand bzw. in der Rückwand eines geschlossenen Gehäuses angeordnet sind, wobei die beiden Gehäusewände so ausgebildet und angeordnet sind, daß ihr Abstand von innen nach außen immer mehr abnimmt, bis ihre äußeren Ränder aneinander grenzen, dadurch gekennzeichnet, daß das Gehäuse (40) einen diskusförmigen Querschnitt besitzt.
2. Lautsprecher nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittelachsen der beiden Wandler (42 bzw. 43) zusammenfallen.
3. Lautsprecher nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Gehäuse rotationsymmetrisch ist und die Mittelachsen beider Wandler (42 bzw. 43) mit der Rotationsachse zusammenfallen.
4. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß beide Wandler (42 bzw. 43) so im Gehäuse (40) angeordnet sind, daß ihre Membranen (44 bzw. 45) im wesentlichen bündig mit den äußeren Oberflächen der beiden Gehäusewände (46 bzw. 47) abschließen und im nicht erregten Zustand eine möglichst stetige Fortsetzung dieser Oberflächen bilden.
5. Lautsprecher nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Gehäusewände (46 bzw. 47) im wesentlichen aus Kegelflächen bestehen, deren äußere Ränder längs einer geschlossenen Berührungslinie aneinandergrenzen.
6. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Gehäusewände (46 bzw. 47) im wesentlichen aus Kugelabschnitten bestehen, deren äußere Ränder längs einer geschlossenen Berührungslinie aneinandergrenzen und deren Krümmungsradien größer als der Radius (a) der gemeinsamen Berührungslinie sind.
7. Lautsprecher nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß beide Gehäusewände (46 bzw. 47) aus Halbschalen gleicher Form und Größe bestehen.
8. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Durchmesser ($2a$) der gemeinsamen Berührungslinie der beiden Gehäusewände (46 bzw. 47) etwa siebzig Zentimeter beträgt.
9. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand der beiden Membranen (44, 45) bzw. der mittleren Teile der Gehäusewände (46 bzw. 47) kleiner als der Radius (a) der gemeinsamen Berührungslinie ist.
10. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Wandler (42, 43) fest gegeneinander abgestützt sind.
11. Lautsprecher nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß jeder Wandler (42, 43) in einem Ring (62, 63) gelagert ist und beide Ringe (62, 63) durch eine Verstrebung (64) miteinander verbunden sind.
12. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß beide Gehäusewände (46, 47) fest gegeneinander abgestützt sind.
13. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Wandler gedämpft und isoliert in den Ringen (62, 63) bzw. in den Gehäusewänden (46, 47) gelagert sind.

14. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß in der Vorderwand und in der Rückwand des Gehäuses jeweils mehrere elektroakustische Wandler angeordnet sind.

15. Lautsprecher nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die mehreren Wandler jeweils auf einer geraden Linie angeordnet und die Wandler in der Rückwand symmetrisch zu den Wandlern in der Vorderwand montiert sind.

16. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß in der Vorderwand (46) konvexe und/oder konkave Wölbungen (59, 60) ausgebildet sind.

17. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß das Gehäuse in einer aufstellbaren oder aufhängbaren Halterung befestigt ist.

18. Lautsprecher nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Wandler (42 bzw. 43) eine viskoelastische Membran (44 bzw. 45) aufweisen.

Die Erfindung betrifft einen Lautsprecher der im Oberbegriff des Patentanspruchs 1 definierten Gattung.

Lautsprecher dienen zur Umwandlung von elektrischen Signalen in hörbaren Schall und bestehen aus wenigstens einem elektroakustischen Wandler, der in der Regel eine kolbenförmig hin- und herbewegbare Membran aufweist und in einem geschlossenen oder mit wenigstens einer Öffnung versehenen Gehäuse angeordnet ist.

Als wichtigste Größe in der Lautsprechertechnik gilt bisher die Frequenz. Alle HiFi-Normen sind auf das Einhalten bestimmter, von der Frequenz abhängiger Werte ausgerichtet. Dabei wird übersehen, daß Analysen oder Normen, die nur die mittleren, über einen relativ langen Zeitraum gemittelten positiven Amplitudenquadrate des Schalldrucks in Abhängigkeit von der Frequenz berücksichtigen, diejenigen wichtigen Schalldruckwechsel mit einer Dauer von einigen Mikro- oder Millisekunden nicht erfassen können, die das menschliche Ohr ständig verarbeiten muß und deren Spitzenwerte den Differenzen der Spitzenwerte der positiven und negativen Amplituden des Schalldrucks entsprechen. Nicht nur hinsichtlich der Reproduktion von Musik, sondern beispielsweise auch hinsichtlich der durch zu großen Lärm am Arbeitsplatz verursachten Gehörschäden wird daher immer häufiger die Auffassung vertreten, daß die Abhängigkeit des Schalldrucks von der Zeit eine größere Bedeutung als die Abhängigkeit des Schalldrucks von der Frequenz und die Einhaltung bestimmter Frequenzgänge hat (HiFi-Stereofonie, Heft 3/1977, S. 369, »Musikhörtest« und Kommentar; Technical Review, No. 1, 1976, Seiten 4 bis 26, veröffentlicht von Brüel & Kjaer). Diese Auffassung wird dadurch unterstützt, daß die sogenannte erste Wellenfront, d. h. die erste Halbwelle einer von einer Schallquelle ausgestrahlten, rechteck- oder sinusförmigen Schalldruckwelle, besonders wichtig beispielsweise für die Ortung und den Klang einer Schallquelle zu sein scheint, weil sich Druckwechsel innerhalb der ersten Wellenfront, die durch system-immanente Störungen bedingt sind, unangenehm auf die Ortung und den Klang auswirken, wobei unter system-immanenten Störungen solche Störungen oder Fehler im Übertragungsweg bei

der Umwandlung von elektrischen Schwingungen in Schallwellen verstanden werden, die in dem zu reproduzierenden elektrischen Signal nicht vorhanden sind.

Die Erfindung geht daher von der Erkenntnis aus, daß Untersuchungen oder Vorschriften, die auf die Messung eines mittleren Schalldrucks des Frequenzspektrums einer Schallquelle gerichtet sind, keine befriedigenden Ergebnisse liefern können, solange sie nicht von Untersuchungen oder Vorschriften betreffend den zeitlichen Verlauf der ersten Wellenfronten begleitet werden.

Messungen an Lautsprechern mit verschiedenartigen Gehäusen zeigen allerdings, daß die ersten Wellenfronten nur von solchen Lautsprechern gut übertragen werden, deren elektroakustische Wandler in eine unendliche Schallwand eingebaut sind und die sich daher für praktische Zwecke nicht eignen. Gehäuse mit endlichen Dimensionen führen dagegen zu erheblichen Verfälschungen der ersten Wellenfronten, so daß diese von herkömmlichen Lautsprechern nicht sauber reproduziert werden können. Dies gilt vor allem auch für solche Lautsprecher, die mehrere Wandler, z. B. wenigstens je einen Hoch-, Mittel- und Tieftonwandler, aufweisen.

Weiterhin sind bereits Lautsprecher der eingangs bezeichneten Gattung bekannt (US-PS 33 93 764 und Zeitschrift »Audio, our 25th year«, January 1972), die ein mit Öffnungen versehenes bzw. geschlossenes Gehäuse aufweisen, in dessen Vorder- und Rückwand je ein Wandler angeordnet ist. Gehäuse mit Öffnungen liefern dabei völlig unzureichende Ergebnisse im Hinblick auf die Reproduktion der ersten Wellenfront. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, daß die Gehäuseöffnungen während des Betriebs einen ständigen Druckausgleich zwischen den Vorder- und Rückseiten der Membranen jedes Wandlers ermöglichen und bei jedem nach innen gerichteten Hub der Membranen Druckluft nach außen abgeben, bei jedem nach außen gerichteten Hub der Membranen dagegen Luft von außen in das Gehäuse ansaugen. Gehäuseöffnungen können daher nicht nur bei niedrigen Frequenzen zu den bekannten akustischen Kurzschlüssen führen, sondern auch als zusätzliche Strahlungsquellen wirken, die im Vergleich zu den Membranen gegenphasig arbeiten und Druckwellen in vielfacher Weise ungünstig interferieren. Derartige Gehäuseöffnungen wirken daher der Simulation einer unendlichen Schallwand entgegen und haben erhebliche Verfälschungen der ersten Wellenfronten zur Folge.

Mit bekannten Lautsprechern der eingangs genannten Art schließlich, die ein geschlossenes Gehäuse aufweisen (Zeitschrift Audio, our 25th year, January 1972), können ebenfalls keine sauberen Reproduktionen der ersten Wellenfronten erhalten werden. Ein Grund hierfür scheint einerseits darin zu liegen, daß die Gehäuse dieser Lautsprecher quaderförmig sind und einen quadratischen bzw. rechteckigen Querschnitt aufweisen. Andererseits sollen mit derartigen Lautsprechern insbesondere negative akustische Rückkopplungen ausgenutzt werden, die auf Wirkungen innerhalb des Gehäuses beruhen und daher saubere Reproduktionen der ersten Wellenfronten ebenfalls beeinträchtigen. Aus diesen bekannten Lautsprechern läßt sich daher keine Lehre im Hinblick auf die ersten Wellenfronten oder deren saubere Reproduktionen entnehmen.

Die Erfindung geht daher von der weiteren Erkenntnis aus, daß alle bisher bekannten Lautsprecher so ausgebildet sind, daß sie zahlreiche Störungen im

Bereich der ersten Wellenfronten verursachen bzw. einer sauberen Reproduktion der ersten Wellenfronten geradezu entgegenwirken.

Erfindungsgemäß wird aus den genannten Erkenntnissen und Erscheinungen erstmals die Aufgabe abgeleitet, einen Lautsprecher zu schaffen, der die ersten Wellenfronten ähnlich gut reproduziert wie ein in einer unendlichen Schallwand angeordneter Wandler, jedoch ein Gehäuse mit endlichen Dimensionen besitzt. Dabei soll das Gehäuse insbesondere so ausgebildet sein, daß der Lautsprecher bei einer einmaligen, schnellen und sprunghaften Anregung in der einen oder anderen Richtung an einem vor dem Gehäuse befindlichen Meßort einen Schalldruck erzeugt, der nach Erreichen eines Maximalwertes (Minimalwertes) nahezu linear bis auf einen Minimalwert (Maximalwert) abfällt (ansteigt) und erst zu einem möglichst späten Zeitpunkt, z. B. nach mehr als etwa vier Millisekunden, eine Richtungsumkehr im zeitlichen Verlauf erfährt, bevor er wieder seinem Normalwert zustrebt.

Zur Lösung dieser Aufgabe ist der Lautsprecher der eingangs bezeichneten Gattung erfindungsgemäß dadurch gekennzeichnet, daß das Gehäuse einen diskusförmigen Querschnitt besitzt.

Die erfindungsgemäße Kombination eines Lautsprechers der eingangs bezeichneten Art mit einem diskusförmigen Gehäuse bringt den überraschenden Vorteil mit sich, daß bei Sprunganregungen der beiden Wandlermembranen Druckkurven erhalten werden, wie sie bisher nur mit in eine unendliche Schallwand eingebauten Wandlern erhalten werden konnten. Dies wird vor allem darauf zurückgeführt, daß die beiden Wandler in je einer Halbschale eines rotationssymmetrischen, allseits geschlossenen Gehäuses angeordnet sind, wobei die beiden Halbschalen ohne abrupte Übergänge allmählich konvergieren und wobei unter dem Ausdruck »geschlossenen« zu verstehen ist, daß das Gehäuse mit Ausnahme von einigen Lecks, die eine Anpassung des Normaldrucks im Gehäuse an den Druck der äußeren Atmosphäre ermöglichen, keinerlei Öffnungen aufweist.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

Weitere Vorteile, theoretische Grundlagen und wesentliche Merkmale der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnung an Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigt

Fig. 1 einen in eine unendliche Schallwand eingebauten elektroakustischen Wandler;

Fig. 2 die mit einem herkömmlichen Wandler bei der Anordnung nach Fig. 1 aufgenommene Schalldruckkurve in Abhängigkeit von der Zeit;

Fig. 3 die mit einem Wandler neuer Art in der Anordnung nach Fig. 1 aufgenommene Schalldruckkurve in Abhängigkeit von der Zeit;

Fig. 4 einen in einem Raum aufgestellten Lautsprecher, bestehend aus einem elektroakustischen, in einem Gehäuse angeordneten Wandler;

Fig. 5 die mit der Anordnung nach Fig. 4 aufgenommene Schalldruckkurve in Abhängigkeit von der Zeit;

Fig. 6 einen in einem Raum aufgestellten erfindungsgemäßen Lautsprecher, bestehend aus zwei gleichphasig parallel geschalteten, in einem Gehäuse angeordneten Wandlern;

Fig. 7 die mit der Anordnung nach Fig. 6 aufgenommene Schalldruckkurve in Abhängigkeit von der Zeit;

Fig. 8 eine mögliche Erklärung für die mit der Anordnung nach Fig. 6 erzielten Verbesserungen;

Fig.9 die mit den Anordnungen nach Fig.6 aufgenommenen Schalldruckkurven in Abhängigkeit von der Zeit im Vergleich;

Fig. 10 und 11 eine weitere Ausführungsform für das Gehäuse des erfindungsgemäßen Lautsprechers;

Fig.12 die mit der Anordnung nach Fig.10 aufgenommenen Schalldruckkurven in Abhängigkeit von der Zeit;

Fig.13 eine weitere Ausführungsform für das Gehäuse des erfindungsgemäßen Lautsprechers;

Fig.14 eine weitere Ausführungsform für einen erfindungsgemäßen Lautsprecher;

Fig. 15 und 16 Ausführungsformen für die Halterung bzw. Aufstellung der erfindungsgemäßen Lautsprecher im Raum und

Fig.17 eine weitere Ausführungsform für einen erfindungsgemäßen Lautsprecher.

In Fig.1 zeigt eine bekannte Anordnung zum Messen des zeitlichen Verlaufs des Schalldrucks an einem Ort vor dem Lautsprecher ohne Störung durch Echos. In einer Wand 1 eines Raums 2 ist ein elektroakustischer Wandler 3 mit einer Membran 4 befestigt, die mit einer Schwingspule kolbenförmig in Pfeilrichtung hin- und herbewegt werden kann und deren Vorderseite im nicht angeregten Zustand im wesentlichen bündig mit der Wand 1 abschließt (US-Patentschrift 32 01 529). Vor dem Wandler 3 ist ein Mikrofon 5 aufgestellt, das zum Empfang der vom Wandler 3 ausgestrahlten Schallwellen bzw. zur Messung des von diesem erzeugten Schalldrucks am Ort des Mikrofons 5 dient. Das Mikrofon 5, mit dem Schalldrücke bis herab zu 10 Hertz gemessen werden können, ist wie die Mikrofone der Anordnungen nach Fig. 4, 6, 8 und 11 ein Halbzoll-Freifeid-Kondensator-Mikrofon und an einen Elektronenstrahl-Oszillografen angeschlossen, der zur Sichtbarmachung des Schalldrucks am Ort des Mikrofons 5 in Abhängigkeit von der Zeit dient.

Die Wand 1 wird als unendliche Schallwand, die akustische Kurzschlüsse, d.h. eine Ausbreitung der Schalldruckwellen in den im Vergleich zum Raum 2 hinter der Wand 1 befindlichen Raum verhindert. Die Schalldruckwellen breiten sich daher mit Schallgeschwindigkeit in einen Raumwinkel 2π halbkugelförmig aus. Bei der Anordnung des Mikrofons 5 und des Wandlers 3 ist darauf zu achten, daß ihre Abstände von allen reflektierenden Flächen so groß sind, daß Echowellen das Mikrofon 5 erst nach Laufzeiten erreichen, die um mindestens etwa fünf Millisekunden größer als die Laufzeiten sind, die dem direkten Abstand des Wandlers 4 vom Mikrofon 5 entsprechen, was bei einem direkten Abstand von zwei Metern einem Weg von etwa 3,7 Metern entspricht.

Wird die Membran 4 sprunghaft in Richtung des Raums 2 vorgeschoben und in dieser Stellung belassen, ergibt sich am Ort des Mikrofons 5 ein der Kurve 6 der Fig.2 entsprechender Verlauf der Amplitude des Schalldrucks P in Abhängigkeit von der Zeit t . Die Amplitude nimmt zunächst schnell zu, erreicht einen Maximalwert, nimmt dann allmählich ab, durchläuft die dem Normaldruck entsprechende 0-Linie, erreicht einen Minimalwert und strebt dann allmählich wieder dem Normalwert zu.

Bemerkenswert an der Kurve 6 sind die im positiven Bereich angesiedelten Druckspitzen 7, die Schalldruckwechsel in positiver und negativer Richtung anzeigen. Derartige Druckwechsel, die insbesondere durch Schwingungen der Membran bei deren sprunghafter

Anregung und durch andere Feder/Masse-Wirkungen verursacht sind, die sich bei herkömmlichen Wandlern nicht vermeiden lassen, und der weitgehend e-förmige Abfall der Kurve 6 haben erhebliche Verfälschungen des Schalldrucks am Ort des Empfängers und damit Verfälschungen der vom Empfänger wahrgenommenen Information zur Folge, weil sie in der abgestrahlten Information, der der Sprunganregung entspricht, nicht enthalten sind.

Die aus Fig. 3 ersichtliche Kurve 8 zeigt ein nahezu ideales Verhalten. Sie wurde in einer Anordnung nach Fig.1 mit einem Wandler nach DE-PS 18 15 694 und 22 36 374 oder DE-OS 25 00 397 erhalten, der keine wesentlichen Feder/Masse-Wirkungen verursacht und aufgrund der Verwendung einer viskoelastischen Membran selbst bei Sprunganregung keine störenden Druckwechsel hervorruft. Außerdem fällt die Kurve 8 nach Erreichen ihres Maximalwertes bzw. ersten Umkehrpunktes 9 nahezu linear bis zum Minimalwert bzw. zweiten Umkehrpunkt 10 ab, der bei etwa 4,5 Millisekunden liegt.

Die aus dem zeitlichen Abstand der beiden Umkehrpunkte 9 und 10 berechenbare Frequenz kann als system-immanente Resonanzfrequenz des gesamten, aus Wandler 3 und Wand 1 bestehenden Lautsprechersystems bezeichnet werden. Weil die Kurve 8 zwischen den Umkehrpunkten 9 und 10 keinerlei störende Wellungen aufweist und weitgehend linear anstatt nach einer e-Funktion verläuft, müßten mit dem zur Aufnahme der Kurve 8 verwendeten System Rechtecksignale bis herab zu wenigstens etwa 110 Hertz und Sinussignale bis herab zu wenigstens etwa 55 Hertz noch gut zu übertragen sein, weil bei Anregung der Membran mit einem Rechtecksignal dessen erste Halbschwingung dem Bereich zwischen den Umkehrpunkten 9 und 10 zugeordnet werden muß, während bei Anregung der Membran mit einem Sinussignal dessen erstes Viertel zur Auslenkung der Membran auf ihren Maximalwert dient und daher das zweite Viertel der Sinusschwingung dem Bereich zwischen den Umkehrpunkten 9 und 10 zugeordnet werden kann. Die bisherigen Messungen betätigen dies.

Die Anordnung nach Fig.4, die zur Messung des zeitlichen Verlaufs der von einem Lautsprecher mit endlichem, geschlossenen Gehäuse abgestrahlten Druckwellen dient, enthält einen elektroakustischen Wandler 11 mit einer in Pfeilrichtung hin- und herbewegbaren Membran 12. Der Wandler 11 ist in der vorderen Wand 15 eines Lautsprecher-Gehäuses 14 derart montiert, daß die Vorderseite der Membran 12 im nicht angeregten Zustand im wesentlichen bündig mit der vorderen Wand 15 abschließt. Zur Messung des zeitlichen Verlaufs des Schalldrucks sind zwei Mikrofone 16 und 17 vorgesehen, wobei das Mikrofon 16 im wesentlichen in der Mittelachse der Membran 16 und das Mikrofon 17 in einer durch das vordere Ende der Wand 15 gebildeten Ebene in Höhe der Membran 12 angeordnet ist. Das Gehäuse 14 bzw. die Membran 12 und die Mikrofone 16 und 17 sind außerdem in einem geschlossenen Raum 18 derart angeordnet, daß die von der Membran 12 erzeugten Druckwellen die Mikrofone 16 und 17 auf direktem Weg etwa sechs bis zehn Millisekunden früher als irgendeine reflektierte Druckwelle erreichen.

Bei sprunghafter Anregung der Membran 12 ergeben sich die aus Fig.5 ersichtlichen Kurven 19 und 20, wobei die Kurve 19 mit dem Mikrofon 16 und die Kurve 20 mit dem Mikrofon 17 aufgenommen ist. Beide

Kurven 19 und 20 zeigen an einer Stelle t_1 einen abrupten Abfall des Schalldrucks, der den Kurven 6 und 8 gemäß Fig. 2 und 3 fehlt. Dieser Abfall des Schalldrucks ist auf die Endlichkeit des Gehäuses 14 zurückzuführen und bewirkt einen charakteristischen, für Fehlinformationen verantwortlichen Druckwechsel innerhalb der ersten Wellenfront. Bei Verwendung des zur Aufnahme der Kurve 8 verwendeten Wandlers ist der Abfall an der Stelle t_1 besonders deutlich ausgeprägt, weil die Kurven 19 und 20 bis zum Zeitpunkt t_1 einen nahezu linearen Verlauf haben.

Die Ursache für den Druckabfall an der Stelle t_1 läßt sich aus der Schallgeschwindigkeit berechnen. Durch die sprunghafte Anregung der Membran 12 wird in dem Raum 18 eine Druckänderung bewirkt, die sich wegen der Verwendung eines geschlossenen Gehäuses wie im Fall der unendlichen Schallwand nach Fig. 1 zunächst nur in den unmittelbar vor der Membran 12 befindlichen Raum ausbreitet. Etwa nach einer Zeit $t = a/c$, wobei a der Abstand des Membranmittelpunkts vom Ende der Wand 15 und c die Schallgeschwindigkeit sind, können sich die von der Membran 12 verursachten Druckänderungen auch in den Raum ausbreiten, der hinter der Wand 15, d. h. auf der vom Mikrofon 16 abgewandten Seite der Wand 15 liegt. Mit anderen Worten können sich die Druckänderungen nach der Zeit $t = a/c$ in einen Raumwinkel 4π anstatt 2π ausbreiten. Dieser Effekt hat zur Folge, daß der Schalldruck am Ort des Mikrofons 16 nach einer Zeit von etwa $t = a/c$ ab Beginn der Messung plötzlich abrupt abfällt. Messungen haben ergeben, daß der aus Fig. 5 ersichtliche Abfall des Drucks an der Stelle t_1 tatsächlich im wesentlichen dem Wert a/c entspricht. Entsprechende Überlegungen bestätigen, daß auch der mit dem Mikrofon 17 gemessene Schalldruckabfall (Kurve 20) auf die Endlichkeit des Gehäuses 14 zurückgeführt werden muß.

Entsprechende Berechnungen bestätigen, daß auch der mit dem Mikrofon 17 gemessene Schalldruckabfall (Kurve 20) auf die Endlichkeit des Gehäuses 14 zurückgeführt werden muß. Weitere Beweise hierfür liefern Messungen an Gehäusen, deren Höhen und Breiten unterschiedliche Werte besitzen oder in die die Wandler bzw. Membranen unsymmetrisch eingesetzt sind. Die auf diese Weise ermittelten Kurven zeigen nämlich stets dann einen abrupten Abfall des Schalldrucks, wenn die von der Membran ausgehende Schallwelle in irgendeiner Richtung ein Ende des Gehäuses erreicht.

Bei Verwendung eines endlichen Gehäuses kann die erste Wellenfront daher nur dann sauber reproduziert werden, wenn das Zeitintervall $t = a/c$ größer als etwa fünf Millisekunden wird. Hierzu müßte die Strecke a etwa 1,7 Meter betragen, was für die praktische Anwendung unrealistisch ist. Bei allen üblichen Gehäusen beträgt die Strecke a nur etwa zehn bis vierzig Zentimeter entsprechend Werten $t = a/c$ von 0,294 und 1,17 Millisekunden bzw. Frequenzen von 1700 und 425 Hertz. Unterhalb von diesen Frequenzen können die ersten Wellenfronten mit üblichen Gehäusen nicht mehr sauber reproduziert werden.

Erfindungsgemäß wurde überraschend gefunden, daß sich der durch das Gehäuse bedingte Abfall des Schalldrucks erheblich vermindern läßt, wenn in die Rückwand des Gehäuses ein zweiter elektroakustischer Wandler eingebaut wird, dessen Abstrahlungsverhalten dem Abstrahlungsverhalten des in der Vorderwand eingebauten Wandlers zumindest bei den durch das

Gehäuse gestörten Frequenzen im wesentlichen entspricht und der im Vergleich zum ersten Wandler derart elektrisch »gleichphasig« angeregt wird, daß sich die Membranen beider Wandler stets gleichzeitig nach außen bzw. gleichzeitig nach innen bewegen. Eine derartige Anordnung ist in Fig. 6 schematisch dargestellt.

In einem Raum 22 ist ein geschlossenes, quaderförmiges Gehäuse 23 angeordnet, in dessen Vorderwand 24 ein Wandler 25 mit einer Membran 26 angeordnet ist. In der zur Vorderwand parallelen Rückwand 27 des Gehäuses 23 ist ein gleichartiger Wandler 28 mit einer Membran 29 montiert. Beide Wandler 25 und 28 sind so angeordnet, daß ihre Membranen 26 und 29 im nicht angeregten Zustand im wesentlichen bündig mit der Vorder- bzw. Rückseite der Vorder- bzw. Rückwand 24 bzw. 27 abschließen. Beide Membranen können wie in den vorhergehenden Beispielen kolbenförmig oder schüsselförmig hin- und herbewegt werden, und die beiden Wandler 25 und 28 sind elektrisch so geschaltet, daß die Membranen bei einer Sprunganregung gleichzeitig in Richtung der Pfeile P_1 und P_2 nach außen vorgeschoben werden. Der Schalldruck wird vor dem Wandler 25 mit einem Mikrofon 30 gemessen. Beide Wandler 25 und 28 bzw. ihre Membranen 26 und 29 sind außerdem koaxial angeordnet.

Die mit der Anordnung nach Fig. 6 erhaltene Kurve 31 ist in Fig. 7 dargestellt und zeigt, daß der für die Kurve 19 nach Fig. 5 charakteristische Druckabfall an der Stelle t_1 nahezu verschwunden ist und daß sich im Vergleich zur Kurve 8 nach Fig. 3 ein etwas breiteres Kurvenstück zwischen den beiden Umkehrpunkten 32 und 33 ergibt, welches einer Zeit von etwa fünf Millisekunden entspricht.

Der in der Rückwand 27 angeordnete Wandler 28 hat dieselbe Wirkung wie eine unendliche Schallwand, die in der zwischen den beiden Wandlern 25 und 28 liegenden Symmetrieebene gedacht werden könnte. Das vom Wandler 28 erzeugte Druckwellenfeld könnte daher als »pneumatische Schallwand« von praktisch unendlicher Größe bezeichnet werden. In Fig. 8 ist schematisch angedeutet, daß die von der Membran 26 erzeugten Druckänderungen zwar wie im Fall der Fig. 4 nach Durchlaufen der Strecke a die Neigung haben, sich in den Raumwinkel 4π , d. h. auch in den Raum hinter der Vorderwand 24 auszubreiten. Dies wird jedoch im Gegensatz zu Fig. 4 dadurch verhindert, daß die Membran 29 entsprechende Druckänderungen erzeugt. Die von den beiden Membranen 26 und 29 erzeugten Druckwellenfelder treffen sich in der Symmetrieebene c und werden längs dieser Symmetrieebene genau so beeinflußt, als ob in der Symmetrieebene c eine unendliche Wand angeordnet wäre.

Eine weitere Bestätigung dafür, daß der zweite Wandler 28 wie eine pneumatische Schallwand wirkt, liefern die Kurven 34, 35 und 36 nach Fig. 9.

Die Kurve 34 wurde mit einer Anordnung nach Fig. 6 aufgenommen, wobei die Wandler 25 und 28 »gegenphasig«, d. h. so gepolt waren, daß bei einer Sprunganregung die Membran 26 des Wandlers 25 in Richtung des Pfeils P_1 und gleichzeitig die Membran 29 des Wandlers 28 in dieselbe Richtung, d. h. entgegen der Richtung des Pfeils P_2 ausgelenkt wurde. Zur Aufnahme der Kurve 35 wurde nur der Wandler 25 bei kurzgeschlossenem Wandler 28 benutzt, und die Kurve 36 wurde bei »gleichphasiger« Anregung der beiden Wandler 25 und 28 aufgenommen. Außerdem wurden im Gegensatz zu den Fig. 5 und 7 die ersten Echos aufgezeichnet, wobei

diese Echos im wesentlichen durch Reflexionen der Schallwellen am Erdboden zustandekommen. Der Zeitmaßstab ist im Vergleich zu den Fig. 3, 5 und 7 etwa doppelt so groß.

Die Kurve 35 zeigt nach einer Zeit t_5 ein erstes Echo von mittlerer Größe, das etwa 45% der maximalen Amplitude der ersten Wellenfront entspricht, wohingegen das erste Echo der Kurve 36 erheblich größer ist und einem Wert von 95% der maximalen Amplitude der ersten Wellenfront entspricht. Aus diesen Messungen folgt, daß der zweite Wandler 28 für Orte in dem Raum, in dem sich das Mikrofon 30 befindet, dieselbe Wirkung wie eine unendliche Schallwand hat, weil ähnlich große Echos nur mit einer Anordnung nach Fig. 1 gemessen werden können.

Die Kurve 31 (Fig. 7) verläuft zwischen den Umkehrpunkten 32 und 33 nicht völlig linear, weil das Gehäuse 23 nach Fig. 6 quaderförmig ist und die Strecke b (Fig. 6) Störungen verursacht. Ähnliche Störungen ergeben sich bei Anwendung eines kugelförmigen Gehäuses mit einem Durchmesser von beispielsweise 50 Zentimeter.

Die aus der Kurve 31 ersichtlichen Störungen lassen sich durch Verwendung eines Gehäuses nach Fig. 10 weitgehend vermeiden. Der in Fig. 10 dargestellte Lautsprecher enthält ein diskusförmiges, rotationssymmetrisches Gehäuse 40, das im Querschnitt eine rhombusförmige Gestalt hat. Wie aus Fig. 10 ersichtlich ist, sind in der Rotationsachse 41 zwei koaxiale elektroakustische Wandler 42 und 43 derart montiert, daß ihre Membranen 44 und 45 im nicht angeregten Zustand eine möglichst stetige Fortsetzung der Außenseite der Gehäusewandungen darstellen. Die Rotationsachse 41 ist dabei gleichzeitig die Mittelachse beider Membranen 44 und 45. Die Schaltung der beiden Wandler 42 und 43 ist wie beim Lautsprecher nach Fig. 6 so, daß beide Wandler elektrisch gleichphasig angeregt werden. Von den Befestigungsrandern der Wandler 42 und 43 an wird der Abstand von der Vorderwand 46 zur Rückwand 47 des Gehäuses 40 immer kleiner, bis die Wände 46 und 47 in der senkrecht zur Rotationsachse 41 verlaufenden Symmetrieebene 48 aneinanderstoßen. Die Wände 46 und 47 erstrecken sich somit aufeinander zu, bis sie sich am Außenumfang 49 des Gehäuses 40 treffen, und bilden zwei Halbschalen, aus denen das Gehäuse 40 besteht.

Zwischen den Befestigungspunkten der Wandler 42 und 43 und dem Außenumfang 49 des Gehäuses 40 verlaufen die Wände 46 und 47 vorzugsweise nicht eben, sondern mit leicht konvexer Wölbung. Der Grad der Wölbung wird am besten anhand der mit dem Lautsprecher nach Fig. 10 gemessenen Schalldruckkurven festgelegt. Abgesehen davon haben leichte Wölbungen in den Wänden 46 und 47 den Vorteil, daß die Wände gegenüber Biegeschwingungen weniger empfindlich sind. Vorzugsweise sind die Wände 46 und 47 als Kugelflächen ausgebildet, wie durch die gestrichelten Linien in Fig. 10 angedeutet ist. Der Radius der Kugelflächen sollte dabei größer als das Maß a (Fig. 11) sein, um die bei Kugelgehäusen auftretenden Unvollkommenheiten zu vermeiden.

Fig. 11 zeigt die Anordnung eines Lautsprechers nach Fig. 10 in einem Raum 51, wobei zur Messung des Schalldrucks zwei Mikrofone 52 und 53 verwendet werden, die in der Rotationsachse 41 bzw. in der Symmetrieebene 48 in derselben Höhe wie die Membranzentrenpunkte angeordnet sind. Bei Sprunganregung der Membranen 44 und 45 in Richtung der Pfeile

P_1 und P_2 ergeben sich die in Fig. 12 dargestellten Kurven 54 (Mikrofon 52) und 55 (Mikrofon 53), wenn Wandler 42 und 43 entsprechend den DE-PS 18 15 694 und 22 36 374 oder DE-OS 25 00 297 verwendet werden, deren Durchmesser neunzehn Zentimeter bei einem Durchmesser des Außenumfangs 49 des Gehäuses 40 von siebenzig Zentimetern betragen. Beide Wandler 42 und 43 sind im übrigen weitgehend identisch ausgebildet.

Zwischen dem Umkehrpunkten 56 und 57 verlaufen die Kurven 54 und 55 nahezu linear. Der zeitliche Abstand der Umkehrpunkte 56 und 57 beträgt etwa fünf Millisekunden. Die Anstiegszeit zwischen dem Nullpunkt der Anregung und dem ersten Umkehrpunkt 56 der Kurve 54 beträgt etwa achtzehn Mikrosekunden.

Gelegentlich zeigen sich in den gemessenen Schalldruckkurven nach Fig. 12 geringfügige Abweichungen von der Linearität, die durch das Einspannen der Wandler im Gehäuse oder durch Unstetigkeiten beim Übergang von der Gehäusewand auf die Membranfläche und hierdurch bewirkte Interferenzen verursacht sein können. Derartige Störungen lassen sich durch Wellungen oder Gehäusewände, insbesondere der Vorderwand 46 ausgleichen, wobei jede konvexe Wölbung in dieser Wand eine Erhöhung und jede konkave Wölbung in dieser Wand eine Erniedrigung der Kurven 54 und 55 bewirkt. In Fig. 13 ist ein dem Gehäuse nach Fig. 10 entsprechendes Gehäuse dargestellt, das in der vorderen Wand 46 je einen konvexen Wulstring 59 und einen konkaven Wulstring 60 aufweist. Die Grenzen derartiger Korrekturmöglichkeiten sind durch den Innenradius von 9,5 Zentimetern und den Außenradius von 35 Zentimetern des Gehäuses 40 nach Fig. 13 festgelegt, was Frequenzen von etwa 1790 und 486 Hertz bzw. Laufzeiten von 0,28 und 1,02 Millisekunden entspricht.

Aus Fig. 12 ist weiterhin ersichtlich, daß mit den Mikrofonen 52 und 53 (Fig. 11) sehr ähnliche Kurven erhalten werden, wobei die Anstiegszeit der Kurve 54 allerdings wesentlich kürzer ist. Der Lautsprecher nach Fig. 10 ist daher bei sprunghafter Anregung der Membranen praktisch ein Strahler 0.ter Ordnung.

Die Dimensionen der Wandler nach Fig. 6 und 10 richten sich insbesondere nach der erwünschten Lage der zweiten Umkehrpunkte 33 bzw. 57.

Je kleiner das Gehäuse ist, um so kleiner ist der Abstand zwischen den beiden Umkehrpunkten 32 und 33 bzw. 56 und 57. Weiterhin verläuft der Abfall des Schalldrucks in Fig. 12 um so schneller, je größer der aus Fig. 11 ersichtliche Winkel β ist, was mit der Beobachtung des steilen Abfalls an einem kugelförmigen Gehäuse übereinstimmt. Je kleiner der Winkel β ist, d. h. je näher die Außenseiten der Membranen 44 bzw. 45 der Symmetrieebene 48 angenähert werden, um so günstiger wird der Verlauf der Kurven 54 und 55.

Ein besonderer Vorteil des beschriebenen Lautsprechers ist darin zu sehen, daß alle erfindungsgemäßen Gehäusekonstruktionen keine Verschlechterung, sondern allenfalls eine Verbesserung im üblichen Frequenzgang des gesamten Lautsprechers mit sich bringen.

Die Erfindung ist nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt. So ist es beispielsweise möglich, die beiden in der Vorder- und Rückwand des Gehäuses eingebauten Wandler etwas unsymmetrisch und nicht genau koaxial anzuordnen, obwohl mit einer völlig symmetrischen Anordnung gemäß Fig. 10 die besten Ergebnisse erzielt werden. Weiterhin können in der Vorder- und Rückwand des Gehäuses je zwei oder

mehr Wandler angeordnet sein, wie in Fig. 14 in der Draufsicht angedeutet ist, wobei sich durch Anordnung jeweils mehrerer Wandler längs einer geraden Linie, insbesondere auf einer Linie senkrecht zur Rotationsachse 41 und senkrecht zur Zeichenebene in Fig. 10 eine ausgezeichnete Richtungswirkung bzw. Richtungscharakteristik erhalten läßt. In diesem Zusammenhang können auch Gehäuse angewendet werden, die nicht rotationssymmetrisch sind, sondern zylindrische Vorder- und Rückwände aufweisen. Weiterhin sollte darauf geachtet werden, daß an den Übergängen zwischen den Membranen und den Gehäusewänden saubere und fließende Übergänge ohne abrupte Übergänge vorgesehen werden, deren Wirkung aus den Kurven nach Fig. 12 erkennbar wird. Hierzu können alle in der Lautsprechertechnik üblichen Mittel angewendet werden.

Weiterhin könnte der in der Rückwand 47 eingebaute Wandler 43 (Fig. 10) von dem in der Vorderwand 46 eingebauten Wandler 42 abweichen und insbesondere billiger und schlechter sein, sofern nur Frequenzen zu übertragen sind, die größer als die Gehäuseabmessungen sind, weil der hintere Wandler zu höheren Frequenzen immer mehr an Bedeutung verliert, was sich daraus ableiten läßt, daß die Druckabfälle in den Kurven 19 nach Fig. 5, die mit dem Mikrofon 16 nach Fig. 4 aufgenommen wurden, immer erst nach Zeiten erscheinen, die etwa der Laufzeit der Schallwellen vom Membranmittelpunkt zum Gehäuseende entsprechen. Zur Verbesserung der Kurven 20 nach Fig. 5, die mit dem Mikrofon 17 nach Fig. 4 aufgenommen werden, sollten allerdings in der Vorder- und Rückwand weitgehend gleich gute Wandler eingebaut sein, weil zum Schalldruck am Ort des Mikrofons 17 auch bei mittleren Frequenzen noch beide Wandler wesentlich beitragen.

Mit den erfindungsgemäßen Lautsprechern lassen sich bisher nicht gekannte räumliche und zeitliche Auflösungen erreichen, verbunden mit einer optimalen räumlichen Lokalisierung nicht des Lautsprechers selbst, sondern der Schallquellen, die von den zu übertragenden Schallwellen repräsentiert werden sollen. Bei Verwendung von Schallwandlern gemäß DE-PS 18 15 694 und 22 36 374 sowie DE-OS 25 00 397 kommt der weitere Vorteil hinzu, daß auch diese Wandler in dem für die originalgetreue Abstrahlung wichtigen Bereich der ersten Schallwellenfronten keine störenden Druckwechsel bewirken, so daß mit derartigen Wandlern in den erfindungsgemäßen Lautsprechern für das gesamte, aus Wandlern, Membranen und Gehäuse bestehende System eine einzige system-immanente Resonanzfrequenz von etwa fünfzig Hertz erhalten wird. Die erfindungsgemäßen Lautsprecher ermöglichen daher insbesondere Musikwiedergaben von einmaliger Schönheit und Originalität. Hinzu kommt, daß sich die Abstrahlintensität des erfindungsgemäßen Lautsprechers im Vergleich zu Lautsprechern nach Fig. 4 nur sehr wenig ändert, gleichgültig, ob der Lautsprecher im Freien oder im Raum und nahe an einer Wand oder nahe am Boden positioniert ist. Aufgrund der pneumatischen oder akustischen Schallwand und der dadurch bedingten präzisen Abstrahlung der ersten Wellenfront ist der erfindungsgemäße Lautsprecher unabhängig von der Umgebung.

Die Erfindung ist weiterhin nicht darauf beschränkt, daß die system-immanente Resonanzfrequenz bei etwa fünfzig Hertz liegt, weil sich durch Änderung insbesondere der Membranfläche kleinere und größere Reso-

nanzfrequenzen erzielen lassen.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Lautsprechers läßt sich dadurch erzielen, daß die beiden Wandler oder die Vorder- und Rückwand des Gehäuses gegeneinander abgestützt werden. In Fig. 10 ist angedeutet, daß die Wandler 42 und 43 in je einem Ring 62 und 63 abgestützt und beide Ringe 62 und 63 durch eine Verstrebung 64 fest miteinander verbunden sind. Hierdurch werden alle Reaktionskräfte, die durch die gleichphasig parallelen Schwingungen der Schwingspulen und Membranen in Richtung der Pfeile P_1 und P_2 entstehen, von der Verstrebung 64 aufgefangen und nicht auf das Lautsprechergehäuse 40 übertragen. Besonders vorteilhaft ist es, die Wandler zusätzlich mittels viskoelastischen Gummiringen 65 oder dergleichen gedämpft und isoliert in den Ringen 62 und 63 zu lagern, um die Übertragung von Schwingungen auf das Gehäuse zu vermeiden. Alternativ können die Wandler gedämpft und isoliert in den Gehäusewänden gelagert sein, während die Verstrebung 64 an einer anderen Stelle, z. B. im Bereich der Wulstringe 59 und 60 angebracht ist, um an diesen Stellen Durchbiegungen der Gehäusewände zu vermeiden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Lautsprecherboxen können die Gehäuse der erfindungsgemäßen Lautsprecher daher aus wesentlich dünneren, z. B. drei bis vier Millimeter dünnen, Materialien hergestellt werden, ohne daß hierdurch störende Resonanzen auftreten oder Durchbiegungen der Gehäuse zu befürchten sind. Schließlich können im Inneren der Gehäuse der erfindungsgemäßen Lautsprecher dieselben Maßnahmen zur Vermeidung störender Resonanzen (z. B. Ausfüllen mit schallschluckenden Materialien) getroffen werden, wie es bei herkömmlichen Lautsprechern bekannt und üblich ist. Dasselbe gilt für alle sonstigen Maßnahmen außerhalb des Erfindungsgedankens.

Die Montage der erfindungsgemäßen Lautsprecher im Raum kann durch Aufhängen oder Aufstellen erfolgen. Zwei Beispiele hierfür sind in Fig. 15 und 16 angedeutet. Die Abmessungen der für die Montage benötigten Gestelle haben keinen wesentlichen Einfluß auf den Verlauf der ersten Wellenfronten, da ihre Abmessungen klein im Vergleich zu denjenigen Wellenlängen sind, bei denen die erfindungsgemäßen Lautsprecher besonders große Vorteile aufweisen.

Auch das Anwendungsgebiet der erfindungsgemäßen Lautsprecher ist nicht auf die beschriebenen Beispiele beschränkt. Ein besonderes Anwendungsgebiet eröffnet beispielsweise die Kunststoff-Stereofonie, bei der normalerweise je ein Kopfhörer für jedes Ohr verwendet wird, weil stereofone Übertragungen mit nur einem herkömmlichen Lautsprecher nicht möglich sind. Die Kunststoff-Stereofonie läßt sich dagegen mit einem einzigen erfindungsgemäßen Lautsprecher beispielsweise nach Fig. 10 dadurch verwirklichen, daß dem einen Wandler 42 das Signal für das eine Ohr und dem anderen Wandler 43 das Signal für das andere Ohr bei der anhand von Fig. 10 beschriebenen Polung zugeführt wird. Ist der Lautsprecher beispielsweise in der Mitte des Raumes an der Decke aufgehängt, und zwar mit der Rotationsachse 41 parallel zur Decke, so werden die mit dem Kunstkopf gemachten Aufnahmen in den Raum hinein abgebildet. Der Zuhörer kann sich dann an der Stelle des Kunstkopfes etwa am Ort des Mikrofons 53 nach Fig. 11 positionieren, wobei zu beachten ist, wo vorn und wo hinten ist. Eine Festlegung der Richtungen »vorn« und »hinten« kann allerdings dadurch vorweggenommen werden, daß die Wandler 42 und 43 in der in

Fig. 17 angedeuteten Weise leicht schräg gestellt werden, indem den Wandlern ohrähnliche Muscheln aufgesetzt werden oder indem über der Wandlermitte geeignete Blenden angebracht werden. Obwohl bei dieser nur ein Gehäuse benötigten Kunstkopf- 5 Wiedergabe vielfältige Ausgestaltungen möglich sind, scheint es angesichts der heute üblichen Verfahren der Laufzeit- und Intensitäts-Stereofonie allerdings zur Zeit noch zweckmäßiger, für jedes Ohrsignal je einen Lautsprecher (z. B. nach Fig. 10) vorzusehen und die 10 beiden oder mehr Wandler jedes Lautsprechers mit gleicher Phase zu schalten.

Schließlich ist die Erfindung nicht auf die anhand der Fig. 6, 8, 10, 11, 13, 14 und 17 beschriebenen Gehäuseformen beschränkt. Gut geeignet sind beispielsweise auch Gehäuse, deren Querschnitte überall etwa den Querschnitten der Gehäuse nach Fig. 10 entsprechen und daher z. B. sechseckig sind, wobei die oberen und unteren Enden dieser Gehäuse durch je eine ebene Wand abgedeckt werden, deren Grundriß der aus Fig. 10 ersichtlichen Querschnittsform entspricht und daher z. B. ebenfalls sechseckig ist. Auch Mischformen 10 zwischen den beschriebenen Gehäuseformen sind möglich.

Hierzu 4 Blatt Zeichnungen

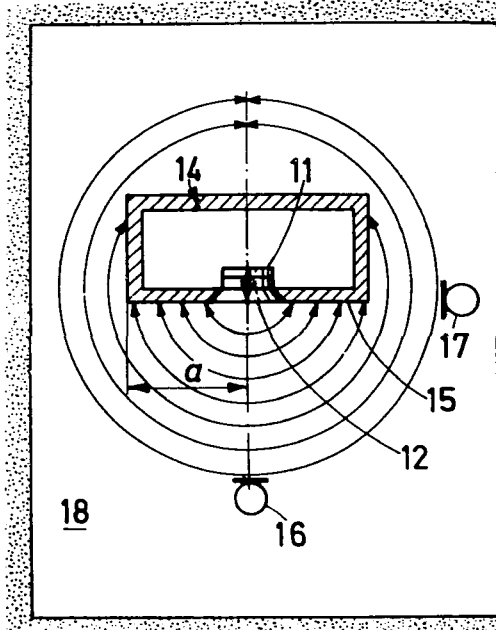


Fig. 4

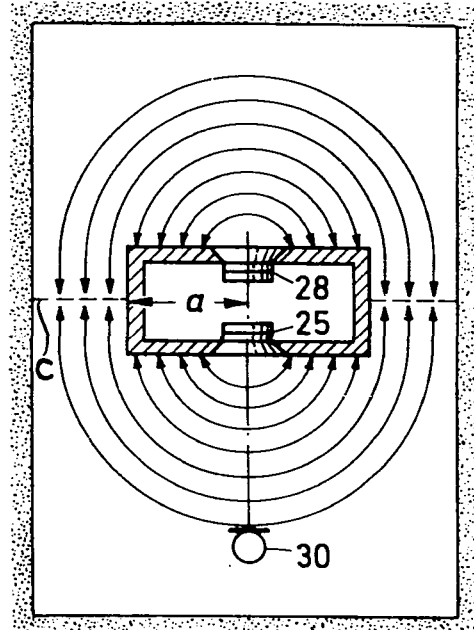


Fig. 8

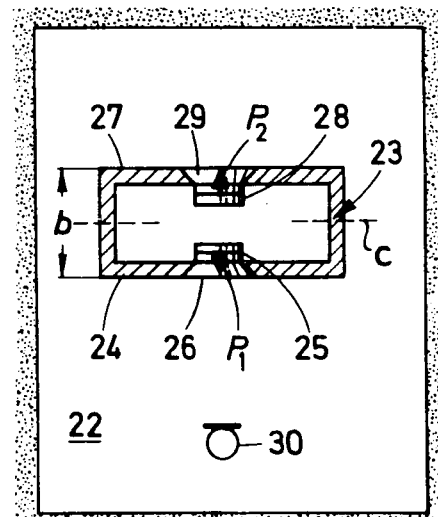


Fig. 6

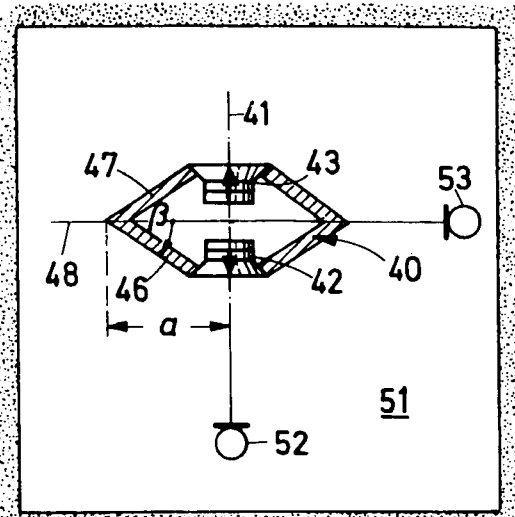


Fig. 11

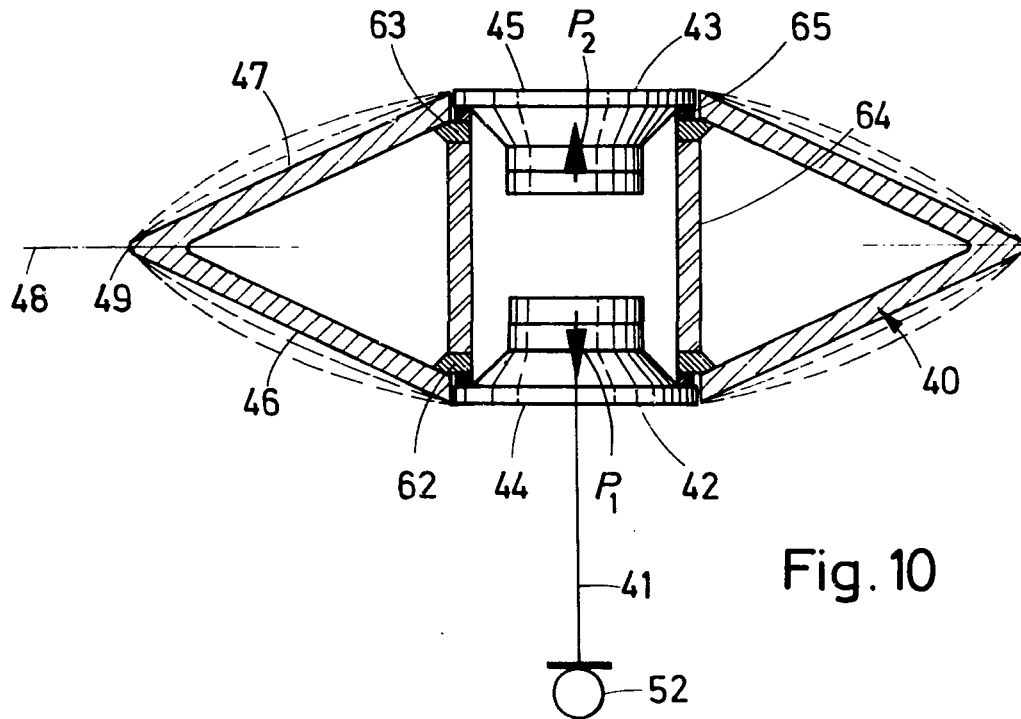


Fig. 10

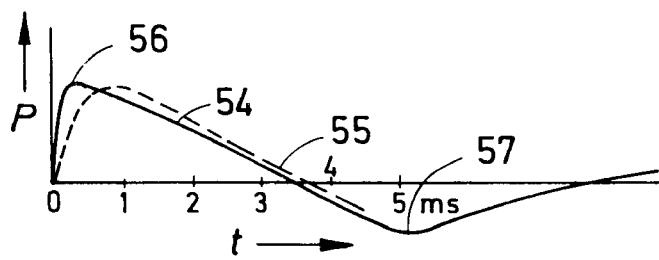


Fig. 12

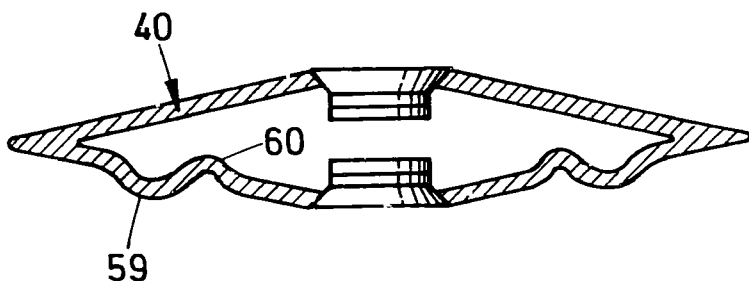


Fig. 13

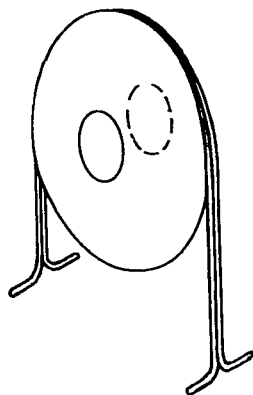


Fig. 16

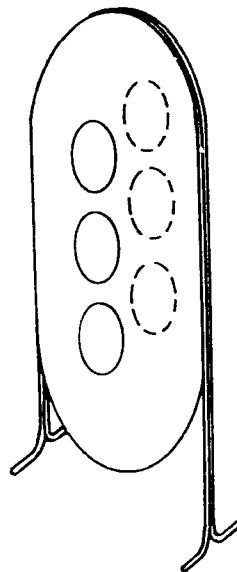


Fig. 14

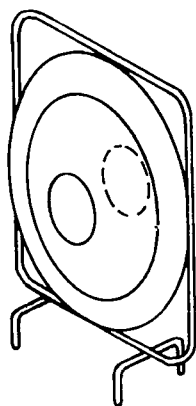


Fig. 15

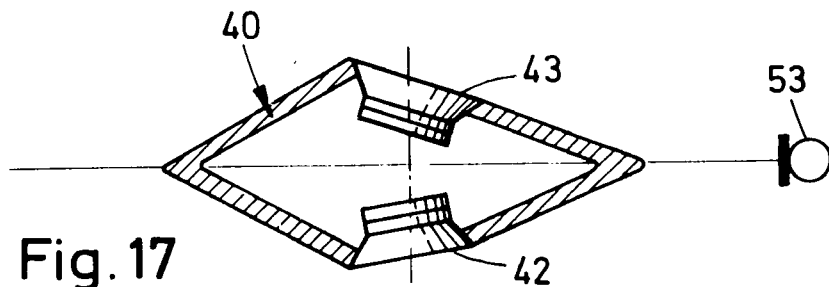


Fig. 17