



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 19 728 T2 2005.09.08**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 110 427 B1**

(51) Int Cl.7: **H04S 1/00**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 19 728.7**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US99/20090**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 948 102.1**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 00/15003**

(86) PCT-Anmeldetag: **02.09.1999**

(87) Veröffentlichungstag  
der PCT-Anmeldung: **16.03.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **27.06.2001**

(97) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: **25.08.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **08.09.2005**

(30) Unionspriorität:  
**148222                      04.09.1998                      US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,  
LI, LU, MC, NL, PT, SE**

(73) Patentinhaber:  
**SRS Labs, Inc., Santa Ana, Calif., US**

(72) Erfinder:  
**KLAYMAN, I., Arnold, Tustin, US**

(74) Vertreter:  
**Flügel Preissner Kastel Schober, 80335 München**

(54) Bezeichnung: **NIEDERFREQUENZ-AUDIOVERBESSERUNGSSYSTEM**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

## Beschreibung

### Technisches Gebiet

**[0001]** Die Erfindung betrifft allgemein Audioverbesserungssysteme und Verfahren zur Verbesserung einer realistischen Tonwiedergabe. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf Einrichtungen und Verfahren zur erhöhten Wahrnehmung des niederfrequenten Anteils der von einem akustischen Wandler, wie etwa einem Lautsprecher, erzeugten Schallenergie.

### Hintergrund

**[0002]** Die Audio- und Multimedia-Industrie befindet sich in einem ständigen Kampf um die Überwindung von Unvollkommenheiten der Tonwiedergabe. So ist es zum Beispiel oft schwierig, niederfrequente Töne, etwa Bässe, angemessen wiederzugeben. Verschiedene herkömmliche Näherungswege zur Verbesserung der Ausgabe von niederfrequenten Tönen schließen den Einsatz von Lautsprechern höherer Qualität mit größerer Konusfläche, größeren Magneten, größeren Gehäusen oder größerem Konusschwingweg ein. Zusätzlich hat man versucht, bei herkömmlichen Systemen niederfrequente Töne mit Resonanzkammern und Trichtern wiederzugeben, welche die akustische Impedanz des Lautsprechers der akustischen Impedanz des freien Raums, der den Lautsprecher umgibt, anpassen.

**[0003]** Nicht für alle Systeme können jedoch einfach kostspieligere oder stärkere Lautsprecher für die Wiedergabe niederfrequenter Töne zum Einsatz kommen. So sind einige herkömmliche Tonwiedergabesysteme, wie etwa kompakte Audiosysteme und Multimedia-Computersysteme auf kleine Lautsprecher ausgelegt. Ferner haben viele Audiosysteme zur Kosteneinsparung weniger präzise Lautsprecher. Solche Lautsprecher sind vom Typ her nicht fähig, niederfrequente Töne richtig wiederzugeben und folglich sind die Töne im typischen Fall nicht so kräftig oder angenehm wie bei Systemen, die niederfrequente Töne genauer wiedergeben.

**[0004]** Einige herkömmliche Verbesserungssysteme versuchen die schlechte Wiedergabe von niederfrequenten Tönen durch Verstärkung der niederfrequenten Signale vor der Eingabe in die Lautsprecher zu kompensieren. Die Verstärkung der niederfrequenten Signale liefert eine höhere Leistung an die Lautsprecher, was die Lautsprecher mit höherer Leistungsaufnahme antreibt. Solche Versuche zur Verstärkung der niederfrequenten Signale können jedoch zu einer Übersteuerung der Lautsprecher führen. Leider kann eine Übersteuerung der Lautsprecher zu einer Verstärkung der Hintergrundgeräusche führen, ablenkende Verzerrungen einführen und die Lautsprecher beschädigen.

**[0005]** Bei noch weiteren herkömmlichen Systemen wird in dem Bemühen um eine Kompensation des Mangels in den niedrigen Frequenzen die Wiedergabe der höheren Frequenzen in einer Weise verzerrt, die eine unerwünschte Klangfärbung einführt.

**[0006]** Zum Beispiel offenbart die UK-Patentanmeldung GB 2016248 mit dem Titel "Detection and Monitoring Device" ein System zur Verbesserung der Audiosignalverarbeitung, das ein verbessertes Audiosignal synthetisiert, indem die Signalenergie des Audiosignals innerhalb eines vorgewählten Energieabschnittes des Audiosignals abgetastet und die abgetastete Signalenergie frequenzabhängig in eine Vielzahl von diskreten Bändern aufgliedert wird. Ferner erzeugt dieses System mit dem Ansprechen auf die Signalenergie von jedem dieser Bänder eine gleiche Vielzahl zweiter Signale, die mit den ersten Signalen kombiniert werden, um verbesserte Audiosignale zu erhalten.

**[0007]** Als weiteres Beispiel offenbart die Anmeldung PTC International WO 99/26454 mit dem Titel „Low-frequency Audio Simulation System" eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Klangverbesserung, worin eine spektrale Formgebung der Oberschwingungen der Niederfrequenz-Information in einem Audiosignalpaar erfolgt, was der Hörer bei der Wiedergabe durch einen Lautsprecher so wahrnimmt, als ob der Lautsprecher eine größere akustische Bandbreite hätte, als dies tatsächlich der Fall ist. Die Wahrnehmung der zusätzlichen Bandbreite ist bei niedrigen Frequenzen besonders betont, insbesondere bei Frequenzen, bei denen der Lautsprecher eine geringere akustische Ausgangsleistung erzeugt.

### Zusammenfassung der Erfindung

**[0008]** Die gegenwärtige Erfindung bietet eine einzigartige Vorrichtung und ein Verfahren zur verbesserten Wahrnehmung niederfrequenter Töne. In Lautsprechern, die bestimmte niederfrequente Töne nicht erzeugen, schafft die Erfindung die Illusion dass die fehlenden niederfrequenten Töne vorhanden sind. So nimmt der Hö-

rer niedrige Frequenzen wahr, die unterhalb der Frequenzen liegen, die der Lautsprecher tatsächlich präzise erzeugen kann. Dieser illusionäre Effekt wird erzielt, indem in einzigartiger Weise die Tonverarbeitung durch das Gehör des Menschen genutzt wird.

**[0009]** Eine Ausführungsform der Erfindung nutzt die Art und Weise, in der ein Hörer mental Musik oder andere Töne wahrnimmt. Der Vorgang der Tonwiedergabe endet nicht mit der vom Lautsprecher erzeugten Schallenergie, sondern schließt die Ohren, die Gehörnerven, das Hirn und die Gedankenabläufe des Hörers mit ein. Das Hören beginnt mit der Funktion der Ohren und des Gehörnervensystems. Das menschliche Ohr kann als empfindliches Übertragungssystem betrachtet werden, das akustische Schwingungen aufnimmt, diese in Nervenimpulse umsetzt und schließlich die "Empfindung" oder Klangwahrnehmung bewirkt.

**[0010]** Es ist bekannt, dass das menschliche Ohr nicht-linear auf akustische Energie anspricht. Diese Nicht-linearität im Mechanismus des Gehörs erzeugt Kombinationsschwingungs-Verzerrungen in der Form zusätzlicher Obertöne und Oberschwingungen, die im Material des tatsächlichen Programms nicht vorhanden sind. Solche nichtlinearen Effekte treten besonders betont bei niedrigen Frequenzen auf. Sie haben einen betonten Einfluss darauf, wie niederfrequente Töne wahrgenommen werden.

**[0011]** In vorteilhafter Weise nutzen einige Ausführungsformen der Erfindung die Art der Verarbeitung von Obertönen und Oberschwingungen zur Erzeugung der Wahrnehmung, dass nicht existierende niederfrequente Töne aus dem Lautsprecher kommen. In einigen Ausführungsformen der Erfindung werden die Frequenzen in höheren Frequenzbändern selektiv verarbeitet, um die Illusion von Signalen niedrigerer Frequenzen zu erzeugen. In anderen Ausführungsformen werden bestimmte Bänder höherer Frequenzen durch eine Vielzahl von Filterfunktionen modifiziert.

**[0012]** Zusätzlich sind einige Ausführungsformen der Erfindung so ausgelegt, dass sie eine Verstärkung der niedrigen Frequenzen von beliebtem Audioprogramm-Material, wie etwa von Musik, bewirken. Musik ist meistens reich an Oberschwingungen. Dementsprechend können diese Ausführungsformen der Erfindung unter Nutzung der Art und Weise, wie das menschliche Ohr niederfrequente Töne verarbeitet, eine breite Vielfalt an Musik modifizieren. In vorteilhafter Weise kann die Musik in ihren vorhandenen Formaten verarbeitet werden, um die erwünschten Effekte zu erzielen.

**[0013]** Dieser neue Näherungsweg schafft eine Reihe signifikanter Vorteile. Weil der Hörer niederfrequente Töne wahrnimmt, die nicht tatsächlich existieren, verringert sich der Bedarf an großen Lautsprechern, größeren Konusschwingwegen oder zusätzlichen Trichtern. So können in einer Ausführungsform kleine Lautsprecher zum Einsatz kommen, die den Eindruck vermitteln, dass die niederfrequenten Töne von größeren Lautsprechern kommen. Wie zu erwarten ist, erzeugt diese Ausführungsform die Wahrnehmung von niederfrequenten Audioformen, wie etwa von Bässen in einer Klangumgebung, die für große Lautsprecher zu klein ist. Große Lautsprecher können ebenfalls dadurch profitieren, dass sie die Wahrnehmung erzeugen, verbesserte niederfrequente Töne zu erzeugen.

**[0014]** Ferner können mit einer Ausführungsform der Erfindung die kleinen Lautsprecher in Mobiltelefonen und tragbaren Tonträgersystemen einen angenehmeren Empfang niederfrequenter Töne bewirken. Der Hörer braucht keine Einbuße an der Qualität niederfrequenter Töne für den Vorteil eines tragbaren Gerätes in Kauf zu nehmen.

**[0015]** In einer Ausführungsform der Erfindung erzeugen kostengünstigere Lautsprecher die Illusion niederfrequenter Töne. Viele billige Lautsprecher können niederfrequente Töne nicht angemessen wiedergeben. Anstatt eine tatsächliche Wiedergabe niederfrequenter Töne mit kostspieligen Lautsprechergehäusen, mit Komponenten von hoher Leistung und großen Magneten zu erreichen, verwendet eine Ausführungsform Töne von höherer Frequenz, um die Illusion von niederfrequenten Tönen zu erzeugen. Als Ergebnis können kostengünstigere Lautsprecher verwendet werden, um eine realistischere und robuste Hörerfahrung zu schaffen.

**[0016]** Ferner erzeugt in einer Ausführungsform der Erfindung die Illusion von niederfrequenten Tönen eine gesteigerte Hörerfahrung mit einem realistischeren Klang. So erhält man mit einer Ausführungsform der Erfindung anstatt der in vielen billigen Systemen nach dem Stand der Technik üblichen verschwommenen, wobbeligen Wiedergabe niederfrequenter Töne eine als präziser und klarer wahrgenommene Tonwiedergabe. Solche kostengünstigen Audio- und Audiovisionsgeräte können beispielsweise Radios, mobile Audiosysteme, Computerspiele, Lautsprecher, CD-Spieler, DVD-Spieler, Multimedia-Präsentationsgeräte, Computer-Tonkarten und dergleichen einschließen.

**[0017]** In einer Ausführungsform erfordert die Erzeugung der Illusion von niederfrequenten Tönen weniger Energie als die tatsächliche Wiedergabe der niederfrequenten Töne. Systeme, die mit Batterie betrieben werden oder in einer Umgebung mit schwacher Leistung arbeiten, können so die Illusion niederfrequenter Töne hervorrufen, ohne so viel an wertvoller Energie zu verbrauchen, wie eine einfache Verstärkung der niederfrequenten Töne oder ein Booster-Effekt.

**[0018]** Weitere Ausführungsformen der Erfindung schaffen die Illusion niederfrequenter Signale mit einer speziellen Schaltkreistechnik. Die betreffenden Schaltkreise sind einfacher als Niederfrequenzverstärker nach dem Stand der Technik und sie können die Herstellungskosten reduzieren. Vorteilhafter Weise kosten diese weniger als Tonverstärkungseinrichtungen nach dem Stand der Technik, die mit komplexen Schaltungen arbeiten.

**[0019]** Noch weitere Ausführungsformen der Erfindung arbeiten mit einem Mikroprozessor, der die offengelegten Verfahren zur Niederfrequenzverstärkung implementiert. In einigen Fällen können vorhandene Audio-komponenten zur Verarbeitung umprogrammiert werden, um die offengelegten einzigartigen Verfahren der Verbesserung von niederfrequenten Signalen von einer oder mehreren Ausführungsformen aufzunehmen. Dadurch lassen sich die Kosten der Aufnahme einer Niederfrequenzverstärkung in vorhandene Systeme signifikant reduzieren.

**[0020]** In einer Ausführungsform nimmt die Tonverstärkungsvorrichtung ein oder mehrere Eingangssignale aus einem Host-System auf und erzeugt ein oder mehrere verstärkte Ausgangssignale. Insbesondere werden zwei Eingangssignale so verarbeitet, dass ein Paar spektral verstärkter Ausgangssignale entsteht, die bei der Wiedergabe durch einen Lautsprecher und beim Anhören die Empfindung einer Tiefenanhebung vermitteln. In einer Ausführungsform wird die niederfrequente Audioinformation anders modifiziert, als die hochfrequente Audioinformation.

**[0021]** In einer Ausführungsform empfängt die Verstärkungsvorrichtung ein oder mehrere Eingangssignale und erzeugt ein oder mehrere verstärkte Ausgangssignale. Insbesondere enthalten die Eingangssignale Schwingungsformen, die einen ersten Frequenzbereich und einen zweiten Frequenzbereich aufweisen. Die Eingangssignale werden so verarbeitet, dass die verstärkten Ausgangssignale entstehen, deren Abspielen mit einem Lautsprecher beim Hörer die Empfindung einer Tiefenanhebung hervorruft. Zusätzlich kann diese Ausführungsform die Information im ersten Frequenzbereich anders modifizieren, als die Information im zweiten Frequenzbereich. Bei einigen Ausführungsformen kann der erste Frequenzbereich Bassfrequenzen aufweisen, die für eine Wiedergabe mit dem gewünschten Lautsprecher zu tief sind und der zweite Frequenzbereich kann mittlere Bassfrequenzen aufweisen, die der Lautsprecher wiedergeben kann.

**[0022]** Eine Ausführungsform modifiziert die Audioinformation, die zwei Stereokanälen gemeinsam ist, anders, als die Energie, die den zwei Kanälen nicht gemeinsam ist. Die Audioinformation, die beiden Eingangskanälen gemeinsam ist, wird als kombiniertes Signal bezeichnet. In einer Ausführungsform wird vom Verbesserungssystem die Amplitude der Phase und der Frequenzen im kombinierten Signal spektral geformt, um die Spitzenbegrenzung zu reduzieren, die sich ergibt, wenn Eingangssignale mit großer Schwingweite wiedergegeben werden, ohne die Wahrnehmung einer Stereowiedergabe zu eliminieren.

**[0023]** Wie nachstehend ausführlicher erörtert, wird in einer Ausführungsform des Tonverbesserungssystems das kombinierte Signal mit einer Reihe verschiedener Filter spektral geformt, um ein verbessertes Signal zu erzeugen. Durch Verbesserung ausgewählter Frequenzbänder innerhalb des kombinierten Signals bietet diese Ausführungsform eine wahrgenommene Lautsprecherbandbreite, die größer ist, als die tatsächliche Bandbreite des Lautsprechers.

**[0024]** Eine Ausführungsform der Einrichtung zur Klangverbesserung schließt eine Vorwärtskoppelung der Signalwege für die zwei Stereokanäle und vier parallele Filter für den kombinierten Signalweg ein. Jeder der vier parallelen Filter enthält ein aus drei in Serie geschalteten Biquadfiltern bestehendes Bandpassfilter sechster Ordnung. Die Übertragungsfunktionen dieser vier Filter sind speziell ausgewählt für eine Phasen- und/oder Amplitudenformung verschiedener Oberschwingungen des Niederfrequenzgehaltes eines Audiosignals. Ganz unerwartet wird durch diese Gestaltung die wahrgenommene Bandbreite des Audiosignals vergrößert, wenn die Wiedergabe über Lautsprecher erfolgt. In einer weiteren Ausführungsform werden die Filter sechster Ordnung durch Tschebyscheff-Filter niedrigerer Ordnung ersetzt.

**[0025]** Weil die spektrale Gestaltung am kombinierten Signal erfolgt, das dann auf parallel geregelten Wegen mit der Stereoinformation kombiniert wird, können die Frequenzen im kombinierten Signal so geändert werden,

dass beide Stereokanäle betroffen sind und einige Signale in bestimmten Frequenzbereichen werden von einem Stereokanal zum anderen Stereokanal gekoppelt. Als Ergebnis kann die bevorzugte Ausführungsform verbesserte Töne in absolut einzigartiger, neuartiger und unerwarteter Weise erzeugen.

**[0026]** Die Einrichtung zur Klangverbesserung kann ihrerseits an eine oder mehrere nachfolgende Signalverarbeitungsstufen angeschlossen werden. Diese nachfolgenden Stufen können eine verbesserte Klangstufe oder eine Raumklangverarbeitung schaffen. Die Ausgangssignale können auch zu anderen Audiogeräten, etwa zu Aufzeichnungsgeräten, Leistungsverstärkern, Lautsprechern und dergleichen geleitet werden, ohne den Betrieb der Tonverbesserungsvorrichtung zu beeinträchtigen.

**[0027]** In noch einer weiteren Ausführungsform wird die Klangverbesserung durch einen Signalprozessor geschaffen, der so konfiguriert ist, dass von einem Eingangssignal mit einem ersten Frequenzsatz ein zweiter Frequenzsatz erzeugt wird. Dieser Signalprozessor kann als Hardware (zum Beispiel in einem digitalen Signalprozessor) oder als Software oder beides, implementiert werden. Der zweite Frequenzsatz wird so erzeugt, dass die Wahrnehmung entsteht, dass der zweite Frequenzsatz mindestens einige der Oberschwingungen des ersten Frequenzsatzes enthält. Der Signalprozessor verwendet einen Nulldurchgangsdetektor, der einen monostabilen Multivibrator antreibt, um eine Reihe von Impulsen zu erzeugen. Die Impulse werden durch Nulldurchgänge des Eingangssignals dem ersten Frequenzsatz entsprechend erzeugt. Der Signalprozessor erzeugt den zweiten Frequenzsatz durch Weiterleitung der Impulsreihe an eine Anzahl von Bandpassfiltern.

**[0028]** In noch einer weiteren Ausführungsform wird die Tonverbesserung durch einen Signalprozessor erreicht, der so konfiguriert ist, dass das Eingangssignal durch eine Reihe von Bandpassfiltern verarbeitet wird. Die Ausgänge der gewählten Bandpassfilter werden kombiniert, um ein kombiniertes Signal zu erzeugen. Das kombinierte Signal wird dem Eingangssignal einer Erweiterung, wie etwa einem Regelverstärker zugeführt. Der Regelverstärker hat einen Reglereingang, der das Ausgangsniveau des Verstärkers bestimmt. Der Reglereingang wird so eingestellt, dass er auf die Hüllkurve des kombinierten Signals anspricht.

**[0029]** In noch einer weiteren Ausführungsform wird das kombinierte Signal nicht der Erweiterung, sondern einer Spitzenverdichtung zugeführt. Ein Ausgang des Spitzenverdichters wird mit dem Eingang der Erweiterung verbunden.

**[0030]** In einigen Ausführungsformen werden die Eingangssignale kombiniert, um ein kombiniertes Signal zu erzeugen, das dann verstärkt wird, um ein verbessertes kombiniertes Signal zu erzeugen. Das verbesserte kombinierte Signal wird dann mit jedem der ursprünglichen Eingangssignale kombiniert, um die Ausgangssignale zu erzeugen. In anderen Ausführungsformen werden die Eingangssignale nicht kombiniert, sondern getrennt gehalten. Die getrennten Eingangssignale werden dann jeweils getrennt verbessert, um die verbesserten Ausgangssignale zu erzeugen. Die gleiche Signalverarbeitung kann auch verwendet werden, um das kombinierte Signal oder die getrennten Signale zu verbessern.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0031]** Diese und andere Gesichtspunkte, Vorteile und neuartigen Merkmale der Erfindung werden beim Lesen der folgenden ausführlichen Beschreibung unter Hinweis auf die angefügten Zeichnungen offenkundig.

**[0032]** [Fig. 1](#) ist ein Blockschaltbild eines Audiosystems, das sich zur Anwendung der gegenwärtigen Erfindung eignet.

**[0033]** [Fig. 2](#) ist ein Blockschaltbild eines Multimedia-Computersystems mit einer Tonkarte und Lautsprechern.

**[0034]** [Fig. 3](#) ist eine graphische Darstellung, die das typische Ansprechen eines kleinen Lautsprechersystems auf Frequenzen zeigt.

**[0035]** [Fig. 4A](#) veranschaulicht das tatsächliche Spektrum und das wahrgenommene Spektrum eines durch zwei getrennte Frequenzen dargestellten Signals.

**[0036]** [Fig. 4B](#) veranschaulicht das tatsächliche Spektrum und das wahrgenommene Spektrum eines durch ein kontinuierliches Frequenzspektrum dargestellten Signals.

**[0037]** [Fig. 4C](#) veranschaulicht den Schwingungsverlauf eines modulierten Trägers.

- [0038] [Fig. 4D](#) veranschaulicht den Schwingungsverlauf von [Fig. 4C](#) nach der Auswertung durch einen Detektor.
- [0039] [Fig. 5](#) ist ein Blockschaltbild eines typischen Computersystems, das eine Tonkarte und Lautsprecher einschließt.
- [0040] [Fig. 6A](#) ist ein Blockschaltbild eines digitalen Tonsystems.
- [0041] [Fig. 6B](#) ist ein Blockschaltbild eines digitalen Tonsystems mit Verarbeitung zur Tonverbesserung.
- [0042] [Fig. 7](#) ist ein Blockschaltbild einer Hardware-Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung, worin die Tonverbesserungsfunktion durch eine Tonverbesserungseinheit erreicht wird.
- [0043] [Fig. 8](#) veranschaulicht die Signalverarbeitung, die verwendet wird, um das Spektrum eines Eingangssignals so zu gestalten, dass die Wahrnehmung niederfrequenter Töne verbessert wird.
- [0044] [Fig. 9](#) ist das Schaltbild eines Bandpassfilters, das in einigen Ausführungsformen der gegenwärtigen Erfindung zum Einsatz kommt.
- [0045] [Fig. 10](#) ist eine graphische Darstellung der Übertragungsfunktionen der im Signalverarbeitungsschaltbild von [Fig. 8](#) gezeigten Bandpassfilter.
- [0046] [Fig. 11](#) ist das Blockschaltbild einer Signalverarbeitung für ein System zur Verbesserung der Wahrnehmung, das einen Nulldurchgangsdetektor verwendet.
- [0047] [Fig. 12A](#) veranschaulicht eine Übertragungsfunktion zur Verbesserung, die durch eine Reihe an die Bandpassfilter von [Fig. 8](#) angeschlossener automatischer Regelverstärker-Schaltkreise geschaffen wurde, wobei die Verbesserung der Übertragungsfunktion einem Eingangssignal mit einer signifikanten niederfrequenten Leistung entspricht.
- [0048] [Fig. 12B](#) veranschaulicht das Gesamtspektrum, das sich aus der in [Fig. 12A](#) gezeigten Verbesserung der Übertragungsfunktion ergibt.
- [0049] [Fig. 12C](#) veranschaulicht eine Übertragungsfunktion zur Verbesserung, die durch eine Reihe an die Bandpassfilter von [Fig. 8](#) angeschlossener automatischer Regelverstärker-Schaltkreise geschaffen wurde, wobei die Übertragungsfunktion zur Verbesserung einem Eingangssignal mit einer sehr geringen niederfrequenten Leistung entspricht.
- [0050] [Fig. 12D](#) veranschaulicht das Gesamtspektrum, das sich aus der in [Fig. 12C](#) gezeigten Verbesserung der Übertragungsfunktion ergibt.
- [0051] [Fig. 13](#) ist das Blockschaltbild einer Signalverarbeitung in einem System, das die in [Fig. 12](#) gezeigte Verbesserung der Übertragungsfunktionen erzeugt.
- [0052] [Fig. 14A](#) ist das Blockschaltbild eines automatischen Regelverstärkers.
- [0053] [Fig. 14B](#) ist das Schaltbild eines automatischen Regelverstärkers, der dem Blockschaltbild von [Fig. 14A](#) entspricht.
- [0054] [Fig. 15](#) ist das Blockschaltbild einer Signalverarbeitung in einem System, das die in [Fig. 12](#) gezeigte Verbesserung der Übertragungsfunktionen mit wählbarem Frequenzgang erzeugt.
- [0055] [Fig. 16A](#) ist das Blockschaltbild eines Tonsystems mit Verarbeitung zur Tieftonverbesserung.
- [0056] [Fig. 16B](#) ist das Blockschaltbild eines Prozessors zur Tieftonverbesserung, der Mehrfachkanäle zu einem einzigen Basskanal kombiniert.
- [0057] [Fig. 16C](#) ist das Blockschaltbild eines Prozessors zur Tieftonverbesserung, der Mehrfachkanäle getrennt verarbeitet.

- [0058] [Fig. 17](#) ist das Blockschaltbild einer Signalverarbeitung in einem System zur Tieftonverbesserung mit wählbarem Frequenzgang.
- [0059] [Fig. 18](#) ist eine graphische Darstellung der Übertragungsfunktionen der im Signalverarbeitungsdiagramm von [Fig. 17](#) gezeigten Bandpassfilter.
- [0060] [Fig. 19](#) ist eine Zeitbereichsdarstellung der Zeit gegen den Amplitudengang des Tieftonverstärker-Schaltkreises.
- [0061] [Fig. 20](#) ist eine Zeitbereichsdarstellung, die das Signal und die Hüllkurvenabschnitte einer typischen, auf einem Instrument gespielten Bassnote darstellt, wobei die Hüllkurve die Abschnitte der Anstiegszeit, Abklingzeit, Verweildauer und Abfallzeit zeigt.
- [0062] [Fig. 21A](#) ist eine Zeitbereichsdarstellung, die den Einfluss des Tieftonverstärker-Schaltkreises auf eine Hüllkurve mit langsamer Anstiegszeit zeigt.
- [0063] [Fig. 21B](#) ist eine Zeitbereichsdarstellung, die den Einfluss des Tieftonverstärker-Schaltkreises auf eine Hüllkurve mit schneller Anstiegszeit zeigt.
- [0064] [Fig. 21C](#) ist eine Zeitbereichsdarstellung der Anstiegszeit in Verbindung mit den [Abb. 21A](#) und [Abb. 21B](#).
- [0065] [Fig. 21D](#) ist eine Frequenzbereichsdarstellung, mit Darstellung der Kurven des Amplitudengangs für das in [Fig. 17](#) gezeigte Tieftonverbesserungs-System, das die in [Fig. 21A-D](#) gezeigten Übertragungsfunktionen der Tieftonverstärkung einschließt.
- [0066] [Fig. 22](#) zeigt eine Ausführungsform eines Schaltbildes, worin das in [Fig. 17](#) dargestellte Bassverbesserungssystem implementiert ist.
- [0067] [Fig. 23](#) ist ein Blockschaltbild einer Ausführungsform eines Tieftonverstärker-Schaltkreises.
- [0068] [Fig. 24](#) ist ein Blockschaltbild einer Verwirklichung des in [Fig. 23](#) gezeigten Tieftonverstärker-Schaltkreises.
- [0069] [Fig. 25](#) ist das Blockschaltbild der Signalverarbeitung eines Systems, das eine Tieftonverbesserung mit Spitzenkomprimierung und einem Tieftonverstärker-Schaltkreis schafft.
- [0070] [Fig. 26](#) ist eine Zeitbereichsdarstellung, die den Einfluss der Spitzenkomprimierung auf eine Hüllkurve mit raschem Anstieg zeigt.
- [0071] [Fig. 27](#) ist das Schaltbild einer Ausführungsform einer Spitzenkomprimierung.

#### Ausführliche Beschreibung der bevorzugten Ausführungsform

- [0072] Die gegenwärtige Erfindung schafft ein Verfahren und ein System zur Verbesserung von Audiosignalen. Das Tonverbesserungssystem verbessert eine realistische Tonwiedergabe durch ein einzigartiges Verfahren zur Tonverbesserung. Allgemein gesprochen empfängt das Tonverbesserungssystem zwei Eingangssignale, ein linkes Eingangssignal und ein rechtes Eingangssignal und erzeugt zwei verbesserte Ausgangssignale, ein linkes Ausgangssignal und ein rechtes Ausgangssignal.
- [0073] Das linke und das rechte Eingangssignal wird gemeinsam verarbeitet, um ein Paar linker und rechter Ausgangssignale zu erzeugen. Insbesondere gleicht die Ausführungsform mit dem verbesserten System die zwischen den zwei Eingangssignalen bestehenden Unterschiede in einer Art und Weise aus, welche die wahrgenommene Bandbreite der Klänge erweitert und verbessert. Zusätzlich justieren viele Ausführungsformen die Lautstärke, die beiden Eingangssignalen gemeinsam ist und reduzieren so die Begrenzung. In vorteilhafter Weise erreichen einige Ausführungsformen eine Klangverbesserung mit vereinfachten, kostengünstigen und einfach herzustellenden Analogschaltkreisen, die keine digitale Signalverarbeitung erfordern.
- [0074] Obwohl die Ausführungsformen hierin unter Bezugnahme auf eine bevorzugte Ausführungsform beschrieben werden, ist die Erfindung nicht darauf beschränkt und kann in einer Reihe anderer Zusammenhänge

zum Einsatz kommen, in denen es wünschenswert ist, andere Ausführungsformen des Klangverbesserungssystems anderen Situationen anzupassen.

### Überblick über ein Klangverbesserungssystem

**[0075]** [Fig. 1](#) ist ein Blockschaltbild eines Tonverbesserungssystems **100**, das ein Tonverbesserungssystem **104** enthält. Das Tonverbesserungssystem **100** schließt eine Schallquelle **102**, das Tonverbesserungssystem **104**, ein wahlweises Signalverarbeitungssystem **106**, einen wahlweisen Verstärker **108**, Lautsprecher **110** und einen Zuhörer **112** ein. Ein Ausgang der Schallquelle **102** wird an einen Eingang des Tonverbesserungssystems **104** angeschlossen. Ein Ausgang des Tonverbesserungssystems **104** wird an einem Eingang des wahlweisen Signalverarbeitungssystems **106** angeschlossen. Ein Ausgang des wahlweisen Signalverarbeitungssystems **106** wird an einen Eingang des Verstärkersystems **108** angeschlossen. Ein Ausgang des Verstärkersystems **108** wird an einem Eingang des Lautsprechersystems **110** angeschlossen. Ein Akustikausgang des Lautsprechersystems **110** versorgt einen oder mehrere Zuhörer **112**.

**[0076]** Die Signalquelle **102** kann zum Beispiel einen Stereoempfänger, ein Radio, einen CD-Spieler, einen Videokassettenrecorder (VCR), Tonverstärker, Theatersysteme, Fernsehanlagen, Laserdiskettengeräte, DVD-Spieler, Geräte für die Aufnahme und Wiedergabe von Tonaufzeichnungen, Multimediageräte, Computerspiele und dergleichen einschließen. Die Signalquelle **102** erzeugt im typischen Fall einen Satz Stereosignale, aber es ist zu verstehen, dass die Signalquelle nicht auf Stereosignale begrenzt ist. In anderen Ausführungsformen kann die Signalquelle **102** eine breite Vielfalt an Audiosignalen erzeugen, wie etwa Audiosysteme, die monophone Signale oder Mehrkanalsignale erzeugen.

**[0077]** Die Signalquelle **102** versorgt das Tonverbesserungssystem **104** mit einem oder mehreren Signalen (zum Beispiel linke und rechte Stereokanäle). Das Tonverbesserungssystem **104** verbessert die niederfrequente Audioinformation durch Modifizierung der linken und rechten Kanäle. In anderen Ausführungsformen brauchen die Eingangssignale für den linken und rechten Kanal keine Stereosignale zu sein und können einen breiten Bereich von Audiosignalen einschließen, wie etwa das Pro-Logic System der Dolby Laboratories, das ein Matrixschema zur Speicherung von vier oder mehr getrennten Audiokanälen auf nur zwei Tonaufzeichnungsspuren verwendet. Die Audiosignale können auch Klangumgebungssysteme einschließen, die vollkommen getrennte Haupt- und Nebenaudiokanäle versorgen. Ein solches System ist das digitale Fünfkanaalsystem der Dolby Laboratories mit der Kurzbezeichnung "AC.3". In einer Ausführungsform wird die Audioinformation, welche die Summe der linken und rechten Kanäle umfasst, als kombinierte Information oder kombiniertes Signal bezeichnet. Eine Ausführungsform gestaltet die spektralen Oberschwingungen der im kombinierten Signal enthaltenen Frequenzen und setzt dann Abschnitte des gestalteten kombinierten Signals wieder in die linken und rechten Kanäle ein, um die Begrenzung zu reduzieren, die sich eventuell im einen oder anderen Kanal aus Eingangssignalen mit niedriger Frequenz und großer Amplitude ergeben könnte.

**[0078]** Das wahlweise Audiosignal-Verarbeitungssystem **106** kann auch andere Audioverarbeitungen übernehmen, wie zum Beispiel decodieren, codieren, ausgleichen, Umgebungsschall verarbeiten, usw.. Das Verstärkersystem **108** verstärkt einen oder mehrere Kanäle und versorgt das Lautsprechersystem **110** mit den verstärkten Signalen.

**[0079]** [Fig. 2](#) veranschaulicht ein typisches Multimedia-Computersystem **200**, das in vorteilhafter Weise eine Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung zur Verbesserung der Klangleistung eines Paares kleiner Desktopcomputer-Lautsprecher **210** einsetzen kann. Die Lautsprecher **210** werden an einer Steckkarte **206** in einer Computereinheit **204** angeschlossen. Die Steckkarte **206** ist im typischen Fall eine Tonkarte, wie in [Fig. 5](#) gezeigt, kann aber auch eine beliebige andere Computer-Schnittstellenkarte sein, die einen Audioausgang erzeugt, einschließlich einer Radiokarte, TV-Beschleunigungskarte, PCMCIA-Karte, ein internes Modem, eine einsteckbare digitale Signalprozessorkarte (DSP), usw.. Ein Computernutzer **202** verwendet den Computer **204**, um ein Computerprogramm zu betreiben, das die Steckkarte **206** zur Erzeugung von Audiosignalen verwendet, die von den Lautsprechern **210** in Schallschwingungen umgesetzt werden.

**[0080]** Die in einem Multimedia-Computersystem verwendeten Lautsprecher **210** sind im typischen Fall kleine Tischgerätausführungen, auf kleine Abmessungen und günstige Kosten ausgelegt und deshalb sind sie nicht fähig, bei niedrigen Frequenzen einen bedeutenden Schalldruckpegel zu erzeugen. Ein typisches kleines Lautsprechersystem zum Einsatz in Multimediacomputern hat ein akustisches Ausgangsverhalten, das bei circa 200 Hz abfällt. [Fig. 3](#) zeigt eine Kurve **306**, die annähernd dem Frequenzgang des menschlichen Ohrs entspricht. [Fig. 3](#) zeigt auch den gemessenen Frequenzgang **308** eines typischen kleinen Lautsprechersystems für Computer, das zur Wiedergabe der höheren Frequenzen einen Hochfrequenztreiber (Hochtonlautsprecher)

und für die Wiedergabe des mittleren Bereichs und der Bassfrequenzen einen Vierzoll-Mittelbereichs-Basstreiber (Tieftonlautsprecher) enthält. Ein solches System mit zwei Treibern wird oft auch als Zweiwegsystem bezeichnet. Lautsprechersysteme, die mehr als zwei Treiber verwenden, sind dem Fachmann bekannt und werden in einer Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung betrieben. Lautsprecher mit nur einem Treiber sind ebenfalls bekannt und funktionieren ebenfalls in Verbindung mit der gegenwärtigen Erfindung. Der Frequenzgang **308** ist in einem rechtwinkligen Graphen dargestellt, wobei auf der X-Achse Frequenzen von 20 Hz bis 20 kHz aufgetragen sind. Dieses Frequenzband entspricht dem normalen Hörbereich des Menschen. Auf der Y-Achse sind in [Fig. 3](#) normalisierte Amplitudengänge von 0 Dezibel bis -50 dB aufgetragen. Die Kurve **308** ist in einem Mittelbereichs-Frequenzband von annähernd 2 kHz bis 10 kHz relativ flach und fällt oberhalb von 10 kHz etwas ab. Im Bereich niedrigerer Frequenzen zeigt die Kurve **308** einen Abfall, der in einem mittleren Bassfrequenzband zwischen 200 Hz und 2 kHz beginnt und wobei der Lautsprecher unter 200 Hz nur noch einen sehr schwachen akustischen Ausgang hat.

**[0081]** Die Lage der in [Fig. 3](#) gezeigten Frequenzbänder dient nur als Beispiel und darf nicht als Begrenzung aufgefasst werden. Die tatsächlichen Frequenzbereiche vom Tieftonband über das mittlere Bassbereichsband und Mittelbereichsband variieren je nach dem Lautsprecher und der Anwendung, für die der Lautsprecher benutzt wird. Der Begriff Tieftonlagen bezeichnet allgemein Frequenzen in einem Band, in dem der Lautsprecher einen im Vergleich zum Ausgang bei höheren Frequenzen, etwa dem Band für die mittleren Bässe, weniger genauen Ausgang aufweist. Das Band für die mittleren Basslagen bezieht sich allgemein auf Frequenzen oberhalb des Bandes für die Tieftonlagen. Der Begriff Mittelbereichsband bezeichnet im Allgemeinen Frequenzen oberhalb des Bandes für die mittleren Basslagen.

**[0082]** Viele Treiber vom Konustyp sind sehr ineffizient bei der Erzeugung einer akustischen Energie mit niedrigen Frequenzen, wo der Konusdurchmesser kleiner ist, als die Wellenlänge der akustischen Schwingungen. Wenn der Konusdurchmesser kleiner ist als die Wellenlänge, erfordert die Aufrechterhaltung eines gleichförmigen Schalldruckpegels für den akustischen Ausgang des Konus eine Vergrößerung des Schwingweges um einen Faktor vier für jede Oktave (Faktor 2), um die die Frequenz abfällt. Der maximal zulässige Schwingweg des Konus ist für den Treiber schnell erreicht, wenn man versucht, das Verhalten bei niedrigen Frequenzen einfach durch Verstärkung der elektrischen Leistungsaufnahme des Treibers zu verbessern.

**[0083]** Der Treiberausgang bei niedrigen Frequenzen kann nicht über eine bestimmte Grenze hinaus verstärkt werden, was die schlechte Klangqualität der meisten kleinen Lautsprechersysteme erklärt. Die Kurve **308** ist typisch für die meisten kleinen Lautsprechersysteme, die einen Niederfrequenz-Treiber von annähernd 4 Zoll Durchmesser verwenden. Lautsprechersysteme mit größeren Treibern tendieren zu einem bemerkenswerten akustischen Ausgang bis zu Frequenzen herunter, die etwas unterhalb der Kurve **308** liegen und Systeme mit kleineren Niederfrequenz-Treibern erzeugen im typischen Fall keine Ausgangsleistung, die so weit herunter reicht, wie in der Kurve **308** gezeigt.

**[0084]** Wie vorstehend erörtert, hat ein Systemdesigner bisher kaum eine große Wahl, wenn es um eine verbesserte Ausgangsleistung bei niedrigen Frequenzen geht. Die vorher bekannten Lösungen waren kostspielig und führten zu Lautsprechern, die für Tischgeräte zu groß waren. Eine beliebte Lösung des Problems mit den niedrigen Frequenzen ist die Verwendung eines sogenannten Sub-Woofer, eines Tieftonlautsprechers, der in der Nähe des Computersystems auf dem Boden steht. Sub-Woofer können einen angemessenen Niederfrequenzausgang erzeugen, aber sie sind teuer und deshalb relativ wenig im Einsatz im Vergleich zu den kostengünstigen Tischgeräte-Lautsprechern.

**[0085]** Anstatt des Einsatzes von Treibern mit großem Durchmesser oder eines Sub-Woofer überwindet eine Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung die Begrenzungen kleiner Systeme bei niedrigen Frequenzen durch Nutzung der Charakteristik des menschlichen Gehörs zur Erzeugung der Wahrnehmung von niederfrequenter akustischer Energie, obwohl diese von Lautsprechersystem gar nicht erzeugt wird.

**[0086]** Das menschliche Gehör funktioniert bekanntlich nicht-linear. Ein nichtlineares System ist einfach gesagt ein System, bei dem eine Verstärkung der Eingabe nicht zu einer proportionalen Verstärkung des Ausgangs führt. Eine Verdoppelung des Schalldruckpegels erzeugt im Ohr nicht die Wahrnehmung, dass sich das Volumen der Schallquelle verdoppelt hat. In der Tat ist das menschliche Ohr in erster Annäherung eine Einrichtung, die einer quadratischen Funktion folgt und mehr auf die Leistung, als auf die Intensität der akustischen Energie reagiert. Diese Nicht-Linearität des Hörmechanismus erzeugt Zwischenmodulations-Frequenzen, die als Obertöne oder Oberschwingungen der tatsächlichen Frequenzen in der akustischen Schwingung wahrgenommen werden.

**[0087]** Der Zwischenmodulationseffekt der Nicht-Linearität des menschlichen Ohres ist in [Fig. 4A](#) in einer idealisierten Darstellung des Amplitudenspektrums von zwei reinen Tönen dargestellt. Das Spektralschaubild in [Fig. 4A](#) zeigt eine erste Spektrallinie **404**, die einer vom Lautsprechertreiber (zum Beispiel einem Sub-Woofer) bei 50 Hz erzeugten Schall-Leistung entspricht. Eine zweite Spektrallinie **402** ist bei 60 Hz dargestellt. Die Linien **404** und **402** sind die tatsächlichen Spektrallinien, die der vom Treiber erzeugten echten Schall-Leistung entsprechen und es wird angenommen, dass keine weitere Schallenergie vorhanden ist. Nichtsdestoweniger erzeugt das menschliche Ohr wegen seiner Nicht-Linearität Zwischenmodulationsprodukte, die der Summe aus den beiden tatsächlichen Spektralfrequenzen und der Differenz zwischen den zwei Spektralfrequenzen entsprechen.

**[0088]** Zum Beispiel wird eine Person, die der von den Spektrallinien **404** und **402** dargestellten akustischen Energie bei 50 Hz lauscht, eine akustische Energie bei 50 Hz wahrnehmen wie in der Spektrallinie **406** gezeigt, bei 60 Hz wie in der Spektrallinie **408** gezeigt und bei 110 Hz wie in der Spektrallinie **410** gezeigt. Die Spektrallinie **410** entspricht nicht der vom Lautsprecher real erzeugten akustischen Energie, sondern vielmehr einer durch die Nicht-Linearität im Ohr erzeugten Spektrallinie. Die Linie **410** tritt bei einer Frequenz von 110 Hz auf, als Summe der beiden realen Spektrallinien ( $110 \text{ Hz} = 50 \text{ Hz} + 60 \text{ Hz}$ ). Es ist zu beachten, dass die Nicht-Linearität des Ohres auch bei der Differenzfrequenz von 10 Hz eine Spektrallinie erzeugt ( $10 \text{ Hz} = 60 \text{ Hz} - 50 \text{ Hz}$ ), aber diese Linie wird nicht wahrgenommen, weil sie unterhalb der menschlichen Hörgrenze liegt.

**[0089]** [Fig. 4A](#) veranschaulicht den Vorgang der Zwischenmodulation im menschlichen Ohr, ist jedoch im Vergleich zu einem realen Programm, etwa einem Musikstück, doch etwas vereinfacht. Das typische Programm-Material, etwa Musik, ist so reich an Oberschwingungen, dass die Musik meistens ein fast kontinuierliches Spektrum aufweist, wie in [Fig. 4B](#) dargestellt. [Fig. 4B](#) gibt denselben Vergleich zwischen der tatsächlichen und wahrgenommenen akustischen Energie wieder, der in [Fig. 4A](#) dargestellt ist, mit der Ausnahme, dass die Kurven in [Fig. 4B](#) kontinuierliche Spektren darstellen. [Fig. 4B](#) zeigt eine Kurve der realen akustischen Energie, **420** und das entsprechende wahrgenommene Spektrum **430**.

**[0090]** Wie bei den meisten nichtlinearen Systemen ist die Nicht-Linearität des Ohres stärker betont, wenn das System große Schwingwege aufweist (zum Beispiel ein hoher Signalpegel), und nicht so stark bei kleinen Schwingwegen. Somit ist für das menschliche Ohr die Nicht-Linearität bei niedrigen Frequenzen stärker betont, weil da das Trommelfell und andere Elemente des Ohres selbst bei einem niedrigeren Schalldruckpegel relativ große mechanische Schwingwege erreichen. So zeigt [Fig. 4B](#), dass die Differenz zwischen der realen akustischen Energie **420** und der wahrgenommenen akustischen Energie **430** im niederfrequenten Bereich am stärksten zum Ausdruck kommt und im Bereich höherer Frequenzen relativ kleiner wird.

**[0091]** Wie in [Fig. 4A](#) und [Fig. 4B](#) gezeigt, erzeugt eine niederfrequente akustische Energie, die vielfache Töne oder Frequenzen enthält, im Zuhörer die Wahrnehmung, dass die akustische Energie im Bereich mittlerer Basslagen einen höheren Spektralgehalt aufweist, als dies tatsächlich der Fall ist. Ist das menschliche Hirn mit einer Situation konfrontiert, in der es denkt, dass Informationen fehlen, dann versucht es, die fehlende Information auf einer unterbewussten Ebene "aufzufüllen". Dieses Ergänzungsphänomen ist die Grundlage für zahlreiche optische Illusionen. In einer Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung kann das Hirn in der Form getäuscht werden, dass es die nicht wirklich vorhandene Niederfrequenzinformation durch die Effekte mittlerer Basslagen in dieser Niederfrequenzinformation auffüllt.

**[0092]** Mit anderen Worten, wenn dem Hirn die Oberschwingungen vorgeführt werden, die in Anwesenheit der niederfrequenten akustischen Energie im Ohr erzeugt würden (zum Beispiel die Spektrallinie **410**), dann ergänzt das Hirn im Unterbewusstsein die Niederfrequenz-Spektrallinien **406** und **408**, die, wie es denkt, vorhanden sein "müssen". Dieser Ergänzungsvorgang wird verstärkt durch einen weiteren Effekt der Nicht-Linearität des menschlichen Ohres, der als Detektoreffekt bekannt ist.

**[0093]** Die Nicht-Linearität des menschlichen Ohres veranlasst das Ohr, als Detektor zu funktionieren, ähnlich wie eine Detektordiode in einem Amplitudenmodulationsempfänger. Wenn ein Oberschwingungston einer mittleren Basslage durch einen Tieftonbass-Ton amplitudenmoduliert wird, erfolgt im Ohr eine Demodulation des modulierten Trägers in der Tieftonlage, um die Tiefton-Hüllkurve zu reproduzieren. [Fig. 4C](#) und [Fig. 4D](#) veranschaulichen in graphischer Form das modulierte Signal und das demodulierte Signal. [Fig. 4C](#) zeigt auf einer Zeitachse ein moduliertes Signal, das ein höherfrequentes Trägersignal enthält (zum Beispiel der Träger für die mittlere Basslage), welches durch ein Tieftonsignal moduliert wird.

**[0094]** Die Amplitude des höherfrequenten Signals wird durch einen Ton von niedrigerer Frequenz moduliert und deshalb variiert die Amplitude des höherfrequenten Signals in Abhängigkeit von der Frequenz des Tons

von niedrigerer Frequenz. Die Nicht-Linearität des Ohres bewirkt eine teilweise Demodulation des Signals, so dass das Ohr die niederfrequente Hüllkurve des höherfrequenten Signals aufnimmt und so die Wahrnehmung des niederfrequenten Tons erzeugt, obwohl bei der niedrigeren Frequenz keine reale akustische Energie erzeugt wurde. Wie beim vorstehend erörterten Zwischenmodulationseffekt kann auch der Detektoreffekt durch geeignete Signalverarbeitung der Signale im Bereich der mittleren Basslagenfrequenzen verstärkt werden, im typischen Fall zwischen 100 und 200 Hz am niedrigen Ende des Bereichs und 500 Hz am höheren Ende des Bereichs. Durch geeignete Signalverarbeitung ist es möglich, ein Klangverbesserungssystem zu schaffen, das die Wahrnehmung niederfrequenter akustischer Energie erzeugt, selbst wenn Lautsprecher verwendet werden, die unfähig oder nur unzulänglich in der Lage sind, eine solche Energie zu erzeugen.

**[0095]** Die Wahrnehmung der tatsächlich in der vom Lautsprecher erzeugten akustischen Energie vorhandenen Frequenzen kann als ein Effekt erster Ordnung erachtet werden. Die Wahrnehmung der zusätzlichen Oberschwingungen, die nicht in den tatsächlichen akustischen Frequenzen vorhanden sind, gleich, ob solche Oberschwingungen durch die Verzerrung einer Zwischenmodulation oder durch den Detektoreffekt erzeugt werden, kann als Effekt zweiter Ordnung erachtet werden.

**[0096]** Vor der Beschreibung der Einzelheiten der in einem Klangverbesserungssystem verwendeten tatsächlichen Signalverarbeitung ist es hilfreich, mehrere Implementierungen des Systems zu untersuchen. Das Klangverbesserungssystem ist nicht auf Multimedia-Computersysteme begrenzt und kann für viele Quellen von Audiosignalen und viele verschiedene Lautsprechertypen zum Einsatz kommen, einschließlich zum Beispiel von Basslautsprecherboxen, Minikomponenten-Stereosystemen, Fernsehsystemen, Radios und sogar von größeren Lautsprechern für den Heimgebrauch oder für kommerzielle Zwecke. Die Beliebtheit von Multimedia-Computersystemen mit unzulänglichen Lautsprechern und die Möglichkeit der Implementierung des Klangverbesserungssystems als Software zum Aufrüsten von Multimedia-Computern macht Multimediacomputer und andere kostengünstige Systeme zu einer attraktiven Plattform für mehrere Ausführungsformen der gegenwärtigen Erfindung.

**[0097]** [Fig. 5](#) ist ein Blockschaltbild eines typischen Multimediacomputer-Systems **500** mit einer Tonkarte **510**, einem ersten Lautsprechersystem **512** und einem zweiten Lautsprechersystem **514**. Das Computersystem **500** enthält ein Datenspeichermedium **508**, einen Prozessor **502** und die Tonkarte **510**, alle angeschlossen an einen Eingangs-/Ausgangs-(I/O-)Bus **508**. Ein Hauptspeicher **504** zur Programm- und Datenspeicherung ist im typischen Fall über einen separaten Speicherbus an den Prozessor **502** angeschlossen. Die Tonkarte **510** enthält einen Eingangs-/Ausgangs-Reglermodul **520**, der am Datenbus **508** angeschlossen ist und die notwendigen Funktionen zur Kommunikation mit dem Datenbus **508** enthält. Innerhalb der Tonkarte **510** verbindet ein Zweirichtungsdatenweg den Eingangs-/Ausgangs-Reglermodul **520** mit einer Datenleitweeinrichtung **522**, die für das Multiplexing und Demultiplexing der Daten von den verschiedenen internen Datenwegen der Tonkarte und dem I/O-Reglermodul **520** sorgt.

**[0098]** Ein erster Ausgang der Datenleitweeinrichtung **522** überträgt Daten an einen ersten Synthesemodul **524**, der Töne erzeugt, gewöhnlich durch FM-Synthese oder Schwingungstabellen-Synthese. Ein Ausgang des ersten Synthesemoduls **524** wird durch einen ersten Regelverstärker **534** in eine erste Mischeinrichtung (Addierglied) **528** übertragen. Ein zweiter Ausgang der Leitweeinrichtung **522** überträgt Daten an einen Eingang eines ersten Digitalsignalprozessors (DSP) **525**. Ein Ausgang des ersten DSP **525** wird an einen Eingang eines ersten Digital-Analogwandlers (DAC) **526** geschickt. Der DSP **525** ist eine wahlweise Einrichtung und nicht auf allen Tonkarten vorhanden. Auf Karten ohne DSP **525** kann ein Ausgang der Leitweeinrichtung **522** direkt an den Eingang des ersten Digital-Analogwandlers **526** geschickt werden. Ein Ausgang der Mischeinrichtung **528** ist über einen Regelverstärker **530** mit einem ersten Leistungsverstärker **520** verbunden. Ein Ausgang des ersten Leistungsverstärkers **520** ist am Lautsprechersystem **512** vorgesehen.

**[0099]** Ein dritter Ausgang der Leitweeinrichtung **522** schickt Daten an einen zweiten Synthesemodul **544**. Ein Ausgang des zweiten Synthesemoduls **544** wird über einen Regelverstärker **554** an eine zweite Mischeinrichtung **548** geschickt. Ein dritter Ausgang der Leitweeinrichtung **522** schickt Daten an einen Eingang eines zweiten Digitalsignalprozessors (DSP) **545**. Ein Ausgang des zweiten DSP **545** ist mit einem Eingang eines zweiten DAC **526** verbunden. Der DSP **545** ist eine wahlweise Einrichtung und falls nicht vorhanden, kann ein Ausgang der Leitweeinrichtung **522** direkt mit dem Eingang des zweiten DAC-Wandlers **546** verbunden werden. Bei einigen Tonkarten kann eine einzelne DSP vorgesehen werden, die den DSP **525** mit dem DSP **545** kombiniert. Ein Ausgang des zweiten DAC **546** wird über einen Regelverstärker **556** an einen Eingang der Mischeinrichtung **548** angeschlossen. Ein Ausgang der Mischeinrichtung **548** wird über einen Regelverstärker **550** an einen zweiten Leistungsverstärker **540** angeschlossen. Ein Ausgang des Leistungsverstärkers **540** wird am Lautsprechersystem **514** vorgesehen.

**[0100]** Die innere Struktur der Tonkarte **510** wurde vereinfacht, um den Einsatz der Tonkarte zur Implementierung verschiedener Ausführungsformen und Merkmale der gegenwärtigen Erfindung wirkungsvoller zu veranschaulichen. Die Tonkarte kann auch zusätzliche Fähigkeiten aufweisen, wie etwa an Analog-Digitalwandler (ADC) (nicht gezeigt) angeschlossene Eingänge, die es dem Benutzer erlauben, aus einer analogen Schallquelle digitale Daten zu Sampeln. Die Tonkarte kann auch Eingänge/Ausgänge für den Anschluss von Joysticks vorsehen und MIDI Eingänge-/Ausgänge zum Anschluss von Musikgeräten mit MIDI-Port. Die Tonkarte **510** kann auch einen Leitungseingangsanschluss und einen Leitungsausgangsanschluss, sowie Eingänge für Audiogeräte, wie CD-Player und digitale Tonbandantriebe (DAT) vorsehen. Die Tonkarte **510** kann ferner eine DSP-Fähigkeit für die Programmierung des Betriebs der Synthesizer **524** und **544** vorsehen. Die Synthesizer **524** und **544** können unter Verwendung der DSPs **525** und **544** programmiert werden oder die Tonkarte **510** kann weitere DSP-Ressourcen zur Programmierung des Betriebs der Synthesizer **524** und **544** vorsehen. Einige Ausführungsformen der gegenwärtigen Erfindung können eine Software enthalten, die auf den DSP-Prozessoren der Tonkarte **510** lauffähig ist, wie in [Fig. 5](#) gezeigt. Wahlweise können alle Tonkartenfunktionen in einem einzigen Chip realisiert werden, wie etwa einem digitalen Signalprozessor auf der Hauptplatine eines Personal Computers und direkt an einen Datenbus, Speicherbus, Multimediabus, Universalserialbus, FireWire-Bus oder einen anderen Eingabe/Ausgabe-Bus angeschlossen werden.

**[0101]** Ein in den Speicher **504** eingelesenes Multimediaprogramm, das auf dem Prozessor **502** läuft, benützt die Tonkarte **510** zur Erzeugung von Audiosignalen, die über die Lautsprecher **512** und **514** in Töne umgesetzt werden. Audiosignale können erzeugt werden, indem Befehle an die Synthesizer **524** und **544** gegeben werden. Die vom ersten Synthesizer **524** erzeugten Audiosignale gelangen über die Regelverstärkerstufe **534** zur Mischeinrichtung **528**, zum Regelverstärker **530**, zum Leistungsverstärker **520** und werden danach durch den Lautsprecher **512** in Töne umgesetzt. Ein ähnlicher Signalverarbeitungsweg, der die Regelverstärker **556** und **550**, die Mischeinrichtung **548** und den Leistungsverstärker **540** beinhaltet, ist für Audiosignale vorgesehen, die im zweiten Synthesizer **544** erzeugt werden.

**[0102]** Ein Multimediaprogramm kann Audiosignale auch aus digitalisierten Audiodaten durch unmittelbare Digital-Analog-Umsetzung unter Verwendung der DAC **526** und **546** erzeugen. Die digitalisierten Audiodaten können auf dem Speichermedium **506** oder im Hauptspeicher **504** gespeichert werden. Das Speichermedium **506** kann eine beliebige Einrichtung zur Datenspeicherung sein, einschließlich eines Diskettenlaufwerks, einer CD, DVD, DAT, usw.. Die auf dem Speichermedium vorhandenen digitalisierten Audiodaten können in beliebigem Rohzustand gespeichert sein, einschließlich Pulsmodulation (PCM) oder in anderer komprimierter Form, einschließlich der adaptiven Pulsmodulation (ADPCM). Audiodaten, die auf einer Festplatte oder einem anderen Speichermedium (zum Beispiel einer CD-ROM) gespeichert sind, das auf einem Dateisystem der Microsoft Windows Umgebung betrieben werden kann, sind im Allgemeinen in einem Dateiformat gespeichert, das dem Fachmann als "Wave" Schwingungsdatei mit dem Dateinamen \*.wav bekannt ist, wobei "\*" eine Stellvertreterbezeichnung ist.

**[0103]** [Fig. 6A](#) ist ein Blockschaltbild, das den Vorgang der Erzeugung von Tönen aus einer digitalen Quelle **600** veranschaulicht. Die digitale Schallquelle **600** kann jede digitalisierte Audiodatenquelle sein, einschließlich zum Beispiel ein Analog-Digital-Wandler, DSP, CD-Spieler, Laserdiskettenspieler, DVD-Spieler, Geräte zum Aufzeichnen und zur Wiedergabe von vorher aufgezeichneten Audiodaten, Multimediageräte, Computerprogramme, Schwingungssignaldateien, Computerspiele und dergleichen. Die digitalen Daten werden von der digitalen Schallquelle **600** zu einem Digital/Analogwandler **602** geschickt, der die digitalen Daten in ein analoges Ausgangssignal umsetzt. Der Wandler **602** schickt das analoge Ausgangssignal an andere Analogeinrichtungen weiter, wie etwa Leistungsverstärker, Lautsprecher, weitere Signalprozessoren, usw..

**[0104]** [Fig. 6B](#) ist ein Blockschaltbild, das ein Klangverbesserungssystem in Übereinstimmung mit einer Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung veranschaulicht. In [Fig. 6B](#) werden die Daten aus der digitalen Schallquelle **600** an einen Klangverbesserungsblock **601** geschickt, der die Signalverarbeitung zur Modifizierung der digitalen Töne für eine verbesserte Wahrnehmung des Niederfrequenzansprechens eines Lautsprechers durchführt. Die modifizierten Digitaldaten aus dem Klangverbesserungsblock **601** werden an den D/A-Wandlerblock **602** geschickt, wo die digitalen Daten in Analogsignale umgesetzt werden. Die Analogsignale aus dem Block **602** werden anderen Analogeinrichtungen zur Verfügung gestellt, wie etwa Lautsprecher, Leistungsverstärker oder andere Signalverarbeitungseinrichtungen. Die Implementierung der Signalverarbeitung im Block **601** kann durch einen Digitalrechner für allgemeine Zwecke, etwa den Prozessor **502** oder einem DSP, etwa DSP **525** und **545**, erfolgen.

**[0105]** Die Verarbeitung kann zum Beispiel mit der in einem Computerspeicher geladenen Software erfolgen, mit einer DSP, die von der Texas Instruments Inc. hergestellt wird (wie zum Beispiel die Reihe TMS320xx), mit

DSPs von anderen Herstellern, mit Multimediaprozessoren wie dem bei der Chromatic Research Inc. erhältlichen MPACT Multimedia Prozessor oder mit Prozessoren wie einem Pentiumprozessor, einem Pentium Pro Prozessor, einem Prozessor 8051, einem MIPS-Prozessor, einem Power PC Prozessor, einem ALPHA-Prozessor usw..

**[0106]** In einer Ausführungsform wird der Signalverarbeitungsblock **601** vollständig mit der Software auf dem Prozessor **502** implementiert. Digitale Daten, (zum Beispiel Daten aus einer Wave-Datei), die durch ein Computerprogramm erzeugt werden, das auf dem Prozessor **502** lauffähig ist, werden an ein separates Signalverarbeitungsprogramm geschickt, das die vom Block **601** repräsentierten Funktionen bietet. Das separate Signalverarbeitungsprogramm modifiziert die digitalen Daten und schickt die modifizierten digitalen Daten an einen D/A-Wandlerblock **602**, der auf der Tonkarte **510** vorhanden sein kann. Diese reine Software-Ausführungsform bietet ein kostengünstiges Verfahren für den Nutzer eines Multimedia-Computersystems, etwa den Nutzer **202** in **Fig. 2** zur Erweiterung des scheinbaren Ansprachvermögens der an den Multimediacomputer angeschlossenen Lautsprecher auf niedrige Frequenzen.

**[0107]** Eine alternative Software-Ausführungsform, die vom Block **601** dargestellte Verarbeitung, wird durch eine DSP in einer an den Computer angeschlossenen Tonkarte geboten. So kann zum Beispiel die durch den Signalverarbeitungsblock **601** dargestellte Verarbeitung durch die DSP **525** und DSP **545** in der Tonkarte **510** von **Fig. 5** implementiert werden. Die durch DSP **525** und DSP **545** dargestellten Funktionen können in einer einzigen DSP kombiniert werden. Die Software-Ausführungsformen der gegenwärtigen Erfindung sind attraktiv, weil sie mit geringem Kostenaufwand implementiert werden können.

**[0108]** Allerdings liegen auch Hardware-Ausführungsformen im Geltungsbereich der gegenwärtigen Erfindung. **Fig. 7** ist ein Blockschaltbild einer Hardware-Ausführungseinheit der gegenwärtigen Erfindung, worin die Funktion der Klangverbesserung durch eine Klangverbesserungseinheit **704** verkörpert wird. Die Klangverbesserungseinheit **704** empfängt die Audiosignale von einer Signalquelle **702**. Die Signalquelle **702** kann eine beliebige Signalquelle sein, einschließlich der in **Fig. 1** gezeigten Signalquelle **102** oder der in **Fig. 5** gezeigten Tonkarte **510**. Die Klangverbesserungseinheit **704** führt die Signalverarbeitung durch und modifiziert die empfangenen Audiosignale, um Audioausgänge zu erzeugen, die für Lautsprecher, Verstärker oder andere Signalverarbeitungseinrichtungen verfügbar sind.

#### Signalverarbeitung

**[0109]** **Fig. 8** ist ein Blockschaltbild **800** der Signalverarbeitung zur Verbesserung der niederfrequenten Audiosignale durch die verschiedenen Signalverarbeitungsblöcke, wie etwa der in **Fig. 7** gezeigten Klangverbesserungseinheit **704**, der in **Fig. 6B** gezeigte Block **601** zur Tonverbesserung und das in **Fig. 1** gezeigte Klangverbesserungssystem **104**. **Fig. 8** kann auch als Ablaufdiagramm zur Beschreibung eines auf einer DSP oder auf einem anderen Prozessor lauffähigen Programms dienen, das die Signalverarbeitungsvorgänge einer Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung implementiert.

**[0110]** **Fig. 8** zeigt zwei Eingänge, einen Eingang **802** für einen linken Kanal und einen Eingang **804** für einen rechten Kanal. Die zwei Kanäle der in **Fig. 8** gezeigten Signalverarbeitung werden übereinstimmend mit der normalen Anordnung von Stereokanälen in passender Weise als linker Kanal und rechter Kanal bezeichnet, obwohl **Fig. 8** nicht auf diese Anordnung begrenzt ist und Systeme mit mehr als zwei Kanälen und Systeme in denen die Kanäle nicht rechts und links angeordnet sind, einschließt.

**[0111]** Die Eingänge **802** und **804** sind beide an ein Addierglied **806**, das einen Ausgang erzeugt, der die beiden Eingänge kombiniert, wobei die Kombination die lineare Summe der zwei Eingänge darstellt. Ein Ausgang des Addiergliedes **806** geht an einen Verstärker **808**. Die Verstärkung des Verstärkers **808** kann auf einen erwünschten Wert eingestellt werden. Addierglied **806** und Verstärker **808** lassen sich auch zu einem einzigen summierenden Verstärker kombinieren, der die beiden Eingänge summiert und verstärkt.

**[0112]** Ein Ausgang des Verstärkers **808** ist an ein Tiefpassfilter **810** geführt. Ein Ausgang des Tiefpassfilters **810** ist an ein erstes Bandpassfilter **812**, ein zweites Bandpassfilter **813**, ein drittes Bandpassfilter **814** und ein viertes Bandpassfilter **815** geführt.

**[0113]** Der Ausgang von jedem Bandpassfilter **812** bis **815** ist an den Eingang eines Verstärkers **816** bis **819** geführt, so dass jedes Bandpassfilter einen Verstärker antreibt. Ein Ausgang von jedem der Verstärker **816** bis **819** ist an ein Addierglied **820** angeschlossen, das den Ausgang erzeugt, der die Summe der Verstärkerausgänge bildet.

[0114] Der Ausgang des Verstärkers **820** ist an einen ersten Eingang eines Addiergliedes **824** für den linken Kanal geführt und der Ausgang des Verstärkers **820** ist an den ersten Eingang eines Addiergliedes **832** für den rechten Kanal geführt. Der Eingang **802** für den linken Kanal ist an einen zweiten Eingang des Addiergliedes **824** für den linken Kanal geführt und der Eingang **804** für den rechten Kanal ist an einen zweiten Eingang des Addiergliedes **832** für den rechten Kanal geführt. Die Ausgänge des Addiergliedes **824** für den linken Kanal und des Addiergliedes **832** für den rechten Kanal sind die linken und rechten Kanalausgänge des Signalverarbeitungs-Blockschaltbildes **800**.

[0115] Die Abfallfrequenz und Bemessung des Tiefpassfilters **810** wird so gewählt, dass eine geeignete Anzahl von Oberschwingungen der mittleren Basslage oberhalb der untersten Frequenz erzeugt wird, die vernünftigerweise von den Multimedia Lautsprechern erzeugt werden kann. Die Bandpassfilter **812** bis **815** werden so gewählt, dass das Spektrum des vom Tiefpassfilter **810** erzeugten Signals geformt wird, um die Oberschwingungen der niederfrequenten Signale zu betonen, die von den Lautsprechern nicht angemessen wiedergegeben werden. Das Tiefpassfilter **810** ist ein Tschebyscheff-Filter zweiter Ordnung mit einem Abfall bei 12 dB/Oktave und einer Abfallfrequenz von 20 Hz. Im typischen Fall sind die Bandpassfilter versetzt abgestuft auf Frequenzen von 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz und 250 Hz. Die Bandpassfilter **812** bis **815** sind Tschebyscheff-Filter zweiter Ordnung, die so implementiert sind, wie in [Fig. 9](#) gezeigt.

[0116] [Fig. 9](#) ist ein Schaltungsbild eines Tschebyscheff-Filters zweiter Ordnung mit einem Eingang **902** und einem Ausgang **918**. Der Eingang **902** ist an einen ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **R1 904** geführt. Ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **R1 904** ist an den ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **R2 906**, an den ersten Anschlusspunkt eines Eingangskondensators **912** und an den ersten Anschlusspunkt eines Rückkoppelungskondensators **910** geführt. Ein zweiter Anschlusspunkt des Eingangskondensators **912** ist an den Umkehreingang eines Operationsverstärkers (Op-Amp) **914** und an einen ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **R3 908** angeschlossen. Ein nichtumkehrbarer Eingang des Op-Amp **914** ist an Erde angeschlossen. Ein Ausgang des Op-Amp **918** ist an den zweiten Anschlusspunkt des Rückkoppelungskondensators **910**, an einen zweiten Anschlusspunkt des Rückkoppelungswiderstandes **908** und an den Ausgang **918** angeschlossen. In einer Ausführungsform hat der Eingangskondensator **912** und der Rückkoppelungskondensator **910** jeweils eine Kapazität von 0,1 Mikrofarad.

[0117] Tabelle 1 führt die Mittenfrequenzen und Schaltkreiswerte der Bandpassfilter **812** bis **815** für die Schaltkreise in [Fig. 9](#) auf. [Fig. 10](#) veranschaulicht die allgemeine Form der Übertragungsfunktionen der Bandpassfilter. [Fig. 10](#) zeigt die Bandpass-Übertragungsfunktionen **1002**, **1004**, **1006** und **1008** entsprechend den Bandpassfiltern **812** bis **815**.

Filter	Frequenz (Hz)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)
812	100	31,6	4,53	63,4
813	150	21,0	3,09	42,46
814	200	15,8	2,26	31,6
815	250	12,7	1,82	25,5

[0118] Die Verstärker **816**, **817**, **818** und **819** werden auf den Verstärkungsfaktor 2 eingestellt. Deshalb ist der Ausgang der Mischeinrichtung **820** und das Signal **821** ein Audiosignal, das die Summe aus linkem und rechtem Stereokanal darstellt, annähernd im Bereich von 100 Hz bis 250 Hz gefiltert und verarbeitet. Dieses verarbeitete Signal wird durch die Mischeinrichtungen **824** und **832** den Optimierungswegen der linken und rechten Stereokanäle zugefügt. Weil das Signal **821** immer noch die Information für den linken und rechten Kanal enthält, wird durch die Rückführung des Signals **821** in den linken und rechten Kanal etwas von der Information des linken Kanals in den rechten Kanal gelangen und umgekehrt. Auf diese Weise gleichen sich die zwei Kanäle etwas an.

[0119] [Fig. 11](#) veranschaulicht die Signalverarbeitung des Klangverbesserungssystems. [Fig. 11](#) ist in mancher Hinsicht der Darstellung in [Fig. 8](#) ähnlich, mit der Ausnahme, dass in [Fig. 11](#) die vier Bandpassfilter von einer monostabilen Kippstufe **1112** angetrieben werden, die durch den Nulldurchgangsdetektor **1110** getriggert

wird. [Fig. 11](#) zeigt zwei Eingänge, einen Eingang **1103** für den linken Kanal und einen Eingang **1101** für den rechten Kanal. Wie in [Fig. 8](#) werden die zwei Kanäle der in [Fig. 11](#) dargestellten Signalverarbeitung der Einfachheit halber, aber nicht als Begrenzung gedacht mit den Begriffen linker Kanal und rechter Kanal beschrieben.

**[0120]** Die Eingänge **1103** und **1101** werden beide an ein Addierglied **1102** angeschlossen, das einen Ausgang erzeugt, der eine Kombination der zwei Eingänge darstellt, wobei diese Kombination die lineare Summe der beiden Eingänge ist. Ein Ausgang des Addiergliedes **1102** wird mit einem Verstärker **1103** verbunden, der auf eine Verstärkung 1 eingestellt ist. Die Verstärkung des Verstärkers **1103** kann jedoch auf jeden gewünschten Wert eingestellt werden. Ein Ausgang des Verstärkers **1103** wird einem Tiefpassfilter **1104** verbunden, das einen Frequenzabfall bei annähernd 100 Hz aufweist. Ein Ausgang des Tiefpassfilters **1104** wird mit einem Spitzenwertdetektor **1106** und einem Verstärker **1108** verbunden, der auf eine Verstärkung von annähernd 0,05 eingestellt ist. Der Spitzendetektor **1106** hat eine Abklingzeitkonstante von 0,25 Millisekunden. Ein Ausgang des Verstärkers **1108** wird mit einem Nulldurchgangsdetektor (ZCD) **1110** verbunden. Ein Ausgang des ZCD **1110** wird mit einem Triggereingang der monostabilen Kippstufe **1112** verbunden, so dass die monostabile Kippstufe jedesmal getriggert wird, wenn der Ausgang des Tiefpassfilters **1104** einen Nulldurchgang verzeichnet.

**[0121]** Wenn die monostabile Kippstufe **1112** getriggert wird, erzeugt sie einen Impuls von 150 Millisekunden. Ein nichtinvertierter Ausgang der monostabilen Kippstufe **1112** wird mit einem ersten Eingang einer Multiplikationsschaltung **1114** und mit einem Regeleingang eines spannungsgeregelten SPST (einpoliger Ausschalter) **1116** so verbunden, dass der Schalter **1116** immer geschlossen wird, wenn der nichtinvertierte Ausgang der monostabilen Kippstufe **1112** auf dem hohen Niveau ist. Ein zweiter Eingang der Multiplikationsschaltung wird mit einem Ausgang des Spitzenwertdetektors **1106** verbunden. Ein Ausgang der Multiplikationsschaltung **1114** wird an einem ersten Anschlusspunkt des Schalters **1114** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Schalters **1114** wird mit dem ersten Bandpassfilter **1118**, einem zweiten Bandpassfilter **1119**, einem dritten Bandpassfilter **1120** und einem vierten Bandpassfilter **1121** verbunden. Der Ausgang von jedem Bandpassfilter **1118** bis **1121** wird mit einem Eingang eines der Verstärker **1126** bis **1129** so verbunden, dass jeder Bandpassfilter einen Verstärker antreibt, wobei jeder Verstärker auf die Verstärkung 2 eingestellt ist. Ein Ausgang von jedem der Verstärker **1126** bis **1129** wird mit einer Mischeinrichtung **1134** verbunden, die einen Ausgang erzeugt, der die Summe der Ausgänge der Verstärker **1126** bis **1129** darstellt. Der Ausgang der Mischeinrichtung **1134** wird mit einem Eingang eines Tiefpassfilters **1136** verbunden, das eine Abfallfrequenz von annähernd 200 Hz hat. Die Hochpassfilter **1142** und **1144** haben beide eine Abfallfrequenz von annähernd 125 Hz.

**[0122]** Ein Ausgang der Mischeinrichtung **1134** ist mit einem ersten Eingang des Addiergliedes **1140** für den linken Kanal und mit einem ersten Eingang des Addiergliedes **1144** für den rechten Kanal verbunden. Der Eingang **1103** für den linken Kanal ist mit einem zweiten Eingang des Addiergliedes **1140** für den linken Kanal verbunden und der Eingang **1101** für den rechten Kanal ist mit einem zweiten Eingang des Addiergliedes **1144** für den rechten Kanal verbunden. Der Ausgang des Addiergliedes **1140** für den linken Kanal ist mit einem Eingang eines Hochpassfilters **1142** verbunden und der Ausgang des Hochpassfilters **1142** ist mit dem Ausgang **1150** für den linken Kanal verbunden. Der Ausgang des Addiergliedes **1144** für den rechten Kanal ist mit einem Eingang des Hochpassfilters **1146** verbunden und der Ausgang des Hochpassfilters **1146** ist mit dem Ausgang **1148** für den linken Kanal verbunden.

**[0123]** Das System von [Fig. 11](#) erzeugt Impulse auf Grundlage der Nulldurchgänge des Tiefpassfilters **1104**. Die Impulse werden zu den Filtern **1118** bis **1121** geschickt und die Filter werden dadurch zum Ansprechen veranlasst und erzeugen Oberschwingungsfrequenzen vor allem im Bereich zwischen 100 Hz und 300 Hz. Weil die Impulse durch die Nulldurchgänge des tiefpassgefilterten Eingangssignals erzeugt werden, sind die von den Filtern **1118** bis **1121** erzeugten Oberschwingungen Oberschwingungen der niederfrequenten Komponenten der Eingangsschwingung. Somit erzeugt das System von [Fig. 11](#) einen Oberschwingungsgehalt ähnlich dem, der durch das menschliche Ohr erzeugt würde, wenn die niederfrequente Information in Schallenergie umgesetzt würde. Die erzeugten Oberschwingungen werden durch die Additionsglieder **1140** und **1144** mit der normalen Information des linken und rechten Kanals gemischt, hochpassgefiltert, um die verbleibenden niederfrequenten Signale zu entfernen und dann an die Lautsprecher geschickt. Die zugefügten Oberschwingungen werden vom Hirn des Zuhörers als dem Niederfrequenzgehalt der akustischen Schwingung entsprechend interpretiert.

**[0124]** In noch einer weiteren Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung werden die durch die Bandpassfilter angetriebenen Verstärker (zum Beispiel die Verstärker **816** bis **819** in [Fig. 8](#)) durch automatische Regelverstärkerblocks ersetzt, die durch die Größe des Niederfrequenzgehaltes des Audiosignals gesteuert wer-

den. Vor der Untersuchung der zur Durchführung dieser Verstärkungsregelung verwendeten Signalverarbeitungselemente ist es hilfreich, zuerst den Einfluss der Verstärkungsregelung auf die Audiosignale am Eingang und am Ausgang zu untersuchen, um ein besseres Verständnis für den Prozess zu gewinnen. Diese Ausführungsform verbessert die Oberschwingungen in den mittleren Basslagen (das heisst, die Oberschwingungen zwischen annähernd 100 Hz und 250 Hz) auf zwei verschiedene Arten. Das Spektrum wird in diesen Bereichen abhängig von der Energiemenge im Eingangssignal, dessen Frequenzen für die Wiedergabe durch den Lautsprecher zu niedrig sind (zum Beispiel Frequenzen unter 100 Hz) angehoben und abgeflacht. Wenn wenig Energie in den Frequenzen unter 100 Hz vorhanden ist, ändert sich das Spektrum nur sehr wenig. Wenn viel Energie in den Frequenzen unterhalb von 100 Hz vorhanden ist, wird das Spektrum im Bereich der mittleren Basslagen signifikant angehoben und abgeflacht. Das Anheben und Abflachen erfolgt über einen Verbesserungsfaktor, der unter Einsatz von Schaltkreisen zur automatischen Verstärkungsregelung (AGC) entsteht. Es ist zu beachten, dass die Frequenzen, die den Bereich der mittleren Basslagen enthalten, variieren und die hierin aufgeführten Frequenzbereiche sind nur beispielshalber aufgeführt und stellen keine Begrenzung dar.

[0125] [Fig. 12A](#) zeigt, wie bei einem Eingangssignal **1202** mit einem hohen Anteil an niedrigen Frequenzen die Regelung durch vier gegeneinander versetzt abgestimmte Bandpassfilter einen Verstärkungsfaktor **1220** erzeugt, um das Ziel zu erreichen. Das Beispiel des Eingangssignals **1202** hat innerhalb dieses Frequenzbereichs einen hohen Gipfel in der Nähe von 40 Hz (zum Beispiel die niedrigste Note auf einer Bassgitarre). Die Amplitude des Spektrums von **1202** flacht ab zu immer kleineren Werten mit zunehmender Frequenz. Vier Bandpasskurven **1204**, **1206**, **1208** und **1210** werden dargestellt, um die Übertragungsfunktion der vier auf 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz und 250 Hz abgestimmten Bandpassfilter zu veranschaulichen. Die Verstärkung von jedem Bandpassfilter (dargestellt durch die Höhe von jeder der Kurven **1204**, **1206**, **1208** und **1210**) wird jeweils durch ein separates AGC geregelt. Jedes AGC wird durch die Amplitude der Kurve **1202** unterhalb 100 Hz (des Sub-Bass Bereichs) gesteuert.

[0126] In Frequenzbereichen, in denen die Amplitude des Eingangs-Audiospektrums fast ebenso hoch ist, wie der Sub-Bass-Bereich, beträgt die AGC-Verstärkung fast 1, wie aus der Kurve **1204** zu ersehen ist. In Frequenzbereichen, in denen die Amplitude des Eingangs-Audiospektrums viel niedriger ist als der Sub-Bass-Bereich nimmt die AGC-Verstärkung wieder zu, wie aus der Kurve **1210** zu ersehen ist. Der Verbesserungsfaktor **1220** ist im Wesentlichen eine zusammengesetzte Übertragungsfunktion aus den Kurven **1204**, **1206**, **1208** und **1210**. [Fig. 12B](#) zeigt den Einfluss einer Anwendung des Verbesserungsfaktors **1220** auf die Eingangsschwingungsform **1202**, woraus sich eine verbesserte Schwingungsform **1240** ergibt. Weil die Schwingungsform **1202** im Sub-Bass-Bereich eine hohe Amplitude hat, ist die verbesserte Schwingungsform **1240** im Vergleich zur Eingangsschwingungsform **1202** im Bereich mittlerer Basslagen stark angehoben und abgeflacht.

[0127] [Fig. 12C](#) und [Fig. 12D](#) zeigen den gleichen Prozess wie in [Fig. 12A](#) und [Fig. 12B](#) für die Erzeugung eines Verbesserungsfaktors **1270** für eine Eingangsschwingungsform **1252**. Anders als die Schwingungsform **1202** hat die Schwingungsform **1252** nur eine geringe niederfrequente Energie und deshalb ist der Verbesserungsfaktor **1270** kleiner. Die in [Fig. 12D](#) gezeigte Ausgangsschwingungsform ist fast identisch mit der Eingangsschwingungsform **1252**, weil der Verstärkungsfaktor **1280** so klein ist.

[0128] [Fig. 13](#) ist ein Blockschaltbild **1300** von einer Ausführungsform des Signalverarbeitungssystems zur Verbesserung im Bereich der niedrigen Frequenzen, wobei AGC zur Erzeugung eines Verbesserungsfaktors eingesetzt werden. [Fig. 13](#) kann auch als Ablaufdiagramm zur Beschreibung eines Programms dienen, das auf einer DSP oder einem anderen Prozessor lauffähig ist und die Signalverarbeitungsvorgänge einer Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung implementiert. [Fig. 13](#) zeigt zwei Eingänge, einen Eingang **1302** für einen linken Kanal und einen Eingang **1304** für einen rechten Kanal. Wie bei den hierin vorstehend aufgeführten Ausführungsformen gelten die Begriffe links und rechts nur der Einfachheit halber und nicht als Begrenzung. Die Eingänge **1302** und **1304** sind beide an das Addierglied **1306** herangeführt, das einen Ausgang erzeugt, der eine Kombination der beiden Eingänge darstellt.

[0129] Ein Ausgang des Addiergliedes **1306** ist mit einem Eingang eines Verstärkers **1308** mit dem Verstärkungsfaktor 1 verbunden. Ein Ausgang des Verstärkers **1308** ist an ein Tiefpassfilter **1310** mit einer Abfallfrequenz von annähernd 400 Hz angeschlossen. Ein Ausgang des Tiefpassfilters **1310** ist an einen ersten Anschlusspunkt eines Potentiometers **1352**, an ein erstes Bandpassfilter **1312**, ein zweites Bandpassfilter **1313**, ein drittes Bandpassfilter **1314** und ein viertes Bandpassfilter **1315** angeschlossen. Der Ausgang von jedem Bandpassfilter **1312** bis **1315** ist an den Audiosignaleingang eines AGC **1316** bis **1319** angeschlossen, so dass jedes Bandpassfilter einen AGC antreibt. Ein Ausgang von jedem der AGC **1316** bis **1319** ist an ein Addierglied **1320** angeschlossen, das die Summe des Verstärkerausganges darstellt.

[0130] Ein zweiter Anschlusspunkt des Potentiometers **1352** ist an Erde gelegt und ein Schleifkontakt des Potentiometers ist an einen Spitzendetektor **1350** angeschlossen. Ein Ausgang des Spitzendetektors **1350** ist an den Reglereingang von jedem der AGC **1316** bis **1319** angeschlossen.

[0131] Der Ausgang des Verstärkers **1320** ist an einen ersten Eingang des Addiergliedes **1324** für den linken Kanal angeschlossen und der Ausgang des Verstärkers **1320** ist an einen ersten Eingang des Addiergliedes **1332** für den rechten Kanal angeschlossen. Der Eingang **1302** für den linken Kanal ist an einen zweiten Eingang des Addiergliedes **1324** für den linken Kanal angeschlossen und der Eingang **1304** für den rechten Kanal ist an einen zweiten Eingang des Addiergliedes **1332** für den rechten Kanal angeschlossen. Die Ausgänge des Addiergliedes **1324** für den linken Kanal und des Addiergliedes **1332** für den rechten Kanal sind ein linker Kanalausgang **1323** und ein rechter Kanalausgang **1333** des Signalverarbeitungsblockes **1300**. In einer Ausführungsform sind die Bandpassfilter **1312** bis **1315** im Wesentlichen identisch mit den in [Fig. 9](#) und Tabelle 1 gezeigten Bandpassfiltern **812** bis **815**.

[0132] AGC **1316** ist (ebenso wie AGC **1317** bis **1319**) ein linearer Verstärker mit einer internen Servo-Rückkopplungsschleife. Die Servoeinrichtung stellt die Amplitude des Ausgangssignals automatisch auf die Amplitude eines Signals am Reglereingang passend ein. Somit bestimmt der Reglereingang und nicht der Eingang des Verstärkersignals den Mittelwert der Amplitude des Ausgangssignals. Wird die Amplitude des Eingangssignals verkleinert, dann erhöht die Servoeinrichtung die Vorwärtsverstärkung des AGC **1316** so, dass der Signalpegel am Ausgang konstant bleibt.

[0133] [Fig. 14A](#) ist ein Blockschaltbild einer Ausführungsform der AGC **1318** und **1319**, die einen Audioeingang **1403**, einen Regeleingang **1402** und einen Audioausgang **1404** beinhaltet. Der Audioeingang **1403** ist mit dem Eingang eines Regelverstärkers **1414** verbunden. Ein Ausgang des Verstärkers **1414** ist mit dem Audioausgang **1404** und einem Negativspitzendetektor **1412** verbunden. Ein Ausgang des Negativspitzendetektors ist mit einem ersten Eingang eines Addiergliedes **1418** verbunden und der Reglereingang **1402** ist mit einem zweiten Eingang des Addiergliedes **1418** verbunden. Ein Ausgang des Addiergliedes **1418** ist mit einem Eingang eines Integriergliedes **1416** verbunden und ein Ausgang des Integriergliedes **1416** ist mit dem Regelverstärkereingang des Verstärkers **1414** verbunden. Das Addierglied **1418** und das Integrierglied **1416** bilden zusammen einen Summenintegrator **1410**.

[0134] [Fig. 14B](#) ist eine Ausführungsform eines Schaltbildes des in [Fig. 14A](#) gezeigten AGC. Wie in [Fig. 14B](#) gezeigt, enthält der Regelverstärker **1414** einen NE572-Kompander **1439** mit den in Tabelle 2 aufgeführten Signalkontaktstiften **2-8**. Der Audioeingang **1403** ist mit einem ersten Anschlusspunkt eines Eingangskondensators **1442** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Eingangskondensators **1442** ist mit dem Kontaktstift **7** des Kompanders **1439** verbunden. Der Eingangskondensator **1442** enthält die parallel geschaltete Kombination eines Kondensators mit 2,2 Mikrofaraad und eines Kondensators mit 0,01 mF. Der Stift **2** des Kompanders **1439** ist über einen Kondensator **1443** von 10,0 mF an Erde gelegt. Stift **4** des Kompanders **1439** ist über einen Kondensator **1444** an Erde gelegt. Stift **8** des Kompanders **1439** ist geerdet. Stift **6** des Kompanders **1439** ist mit einem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **1445A** von 1,0 k $\Omega$  verbunden, ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **1445** ist mit einem Kondensator **1446** von 2,2 mF, einem nichtinvertierenden Eingang eines Op-Amp **1447** und einem nichtinvertierenden Eingang eines Op-Amp **1452** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Kondensators **1446** ist an Erde gelegt. Stift **5** des Kompanders **1439** ist an einen invertierenden Eingang des Op-Amp **1447**, einen ersten Anschlusspunkt eines 17,4 k $\Omega$  Rückkopplungswiderstandes **1449** und an einen ersten Anschlusspunkt eines 17,4 k $\Omega$  Eingangswiderstandes **1450** angeschlossen. Ein Ausgang des Op-Amp **1447** ist an einem zweiten Anschlusspunkt des Rückkopplungswiderstandes **1449** und an einem ersten Anschlusspunkt eines Ausgangskondensators **1448** angeschlossen. Ein Ausgang des Op-Amp **1452** ist an einem zweiten Anschlusspunkt des Eingangswiderstandes **1450** angeschlossen. Ein 10,0 k $\Omega$  Rückkopplungswiderstand ist zwischen einem invertierenden Eingang und dem Ausgang des Op-Amp **1452** angeschlossen. Ein 10,0 k $\Omega$  Eingangswiderstand legt den invertierenden Eingang des Op-Amp **1452** an Masse.

[0135] Der Verstärkungsreglereingang des Verstärkers **1414** ist an einem ersten Anschlusspunkt eines 3,0 k $\Omega$  Eingangswiderstandes **1440** angeschlossen. Ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **1440** ist an den Emitteranschluss eines kleinen Signaltransistors **1441** gelegt, wobei es sich um einen 2N2222 handeln kann. Der Basisanschluss des Transistors ist an Erde gelegt und der Kollektoranschluss des Transistors **1441** ist am Stift **3** des Kompanders **1339** angeschlossen.

[0136] Der negative Spitzendetektor **1412** enthält einen Op-Amp **1438** und eine Diode **1437**. Der Eingang des negativen Spitzendetektors **1412** ist an einen nichtinvertierenden Eingang des Op-Amp **1438** angeschlossen.

Ein Ausgang des Op-Amp **1438** ist an der Kathode der Diode **1437** angeschlossen. Die Anode der Diode **1437** ist an einen invertierenden Eingang des Op-Amp **1437** angeschlossen und an den Ausgang des Spitzendetektors **1412**. Der in [Fig. 13](#) gezeigte Spitzendetektor **1350** kann in ähnlicher Weise gebaut sein wie der negative Spitzendetektor **1412**, mit der Ausnahme, dass die Diode **1437** für den Spitzendetektor **1350** umgekehrt ist.

**[0137]** Der erste Eingang des Summenintegrators **1410** ist an einen ersten Anschlusspunkt der parallelgeschalteten Kombination eines 100,0 k $\Omega$  Widerstandes **1431** und eines 4,7 mF Kondensators **1432** angeschlossen. Der zweite Eingang des Summenintegrators **1410** ist an einem ersten Anschlusspunkt einer parallelgeschalteten Kombination eines 100,0 k $\Omega$  Widerstandes **1433** und eines 4,7 mF Kondensators **1434** angeschlossen. Die zweiten Anschlusspunkte beider paralleler Kombinationen sind am invertierenden Eingang eines Op-Amp **1435** angeschlossen. Ein nichtinvertierender Eingang des Op-Amp **1435** ist geerdet und ein 0,33 mF Rückkoppelungskondensator **1436** ist zwischen dem invertierenden Eingang des Op-Amp **1435** und dem Ausgang des Op-Amp **1435** angeschlossen. Der Ausgang des Op-Amp **1435** ist der Ausgang des Summenintegrators **1410**.

**[0138]** Der NE572 ist ein Regelverstärkerschaltkreis mit hoher Leistung und zwei Kanälen, wobei jeder Kanal für eine dynamische Bereichskomprimierung oder Erweiterung benützt werden kann. Jeder Kanal hat einen Zweiweggleichrichter zur Feststellung des Durchschnittswertes eines Eingangssignals, eine linearisierte, temperaturkompensierte Zelle mit variabler Verstärkung und einen dynamischen Zeitkonstantenpuffer. Der Puffer gestattet eine unabhängige Regelung der dynamischen Anstiegs- und Abklingzeit mit einem Minimum an externen Komponenten und einer verbesserten Verstärkungsregelung niedriger Frequenzen mit geringerer Wellenformverzerrung. Die Stiftanordnungen für die NE572 sind in Tabelle 2 aufgeführt (n, m bezeichnet die Kanäle A, B). Die NE572 wird in den derzeitigen Ausführungsformen als kostengünstiger, geräuscharmer Regelverstärker mit geringer Verzerrung verwendet. Der Fachmann erkennt, dass auch andere Regelverstärker verwendet werden können.

Stift	Funktion
1,15	Nachlauftrimm
2,14	Wiederherstellung
3,13	Gleichrichter-Eingang
4,12	Anstieg
5,11	Ausgangsspannung
6,10	Trimm für Oberschwingungsgehalt
7,9	Eingangsspannung
8	Masse
16	V <sub>CC</sub>

**[0139]** [Fig. 15](#) ist ein Schaltbild eines Signalverarbeitungs-Systems **1500** von einer Ausführungsform des Niederfrequenz-Verbesserungssystems, das wählbare Frequenzbereiche vorsieht. [Fig. 15](#) kann auch als Ablaufdiagramm zur Beschreibung eines Programms dienen, das auf einer DSP oder einem anderen Prozessor lauffähig ist, der die Signalverarbeitungsvorgänge einer Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung implementiert. Das im System **1500** ausgeführte Merkmal der auswählbaren Frequenzbereiche ist auch auf alle vorstehend beschriebenen Ausführungsformen anwendbar. Der Einfachheit halber ist das System **1500** jedoch als Modifikation des Signalverarbeitungssystems **1300** von [Fig. 13](#) dargestellt und deshalb werden hier nur die Unterschiede zwischen dem System **1300** und dem System **1500** beschrieben. Im System **1500** ist der Ausgang des Bandpassfilters **1315** nicht wie im System **1300** direkt am Eingang des AGC **1319** angeschlossen, sondern am ersten Schaltkontakt eines einpoligen Umschalters (spdt) **1562**. Der Pol des Schalters **1562** ist am Signaleingang des AGC **1319** vorgesehen. Ein Eingang eines Bandpassfilters **1560** ist am Eingang des Bandpassfilters **1315** so angeschlossen, dass die Bandpassfilter **1560** und **1315** die gleichen Eingangssignale auf-

nehmen. Ein Ausgang des Bandpassfilters **1560** ist am zweiten Schaltkontakt des einpoligen Umschalters **1562** vorgesehen.

**[0140]** Es ist wünschenswert, das Bandpassfilter **1560** auf eine Frequenz unter 100 Hz, wie zum Beispiel 60 Hz, abzustimmen. Wenn sich der Schalter **1562** in einer ersten Position befindet, die dem ersten Schaltkontakt entspricht, wählt er das Bandpassfilter **1315** und veranlasst das System **1500** zu einem mit dem System **1300** identischen Betrieb, bei dem die Bandpassfilter bei 100, 150, 200 und 250 Hz vorgesehen sind. Befindet sich der Schalter **1562** in der zweiten Position, die dem zweiten Schaltkontakt entspricht, dann wählt er das Bandpassfilter **1315** ab und wählt das Bandpassfilter **1560** an, bei dem zum Beispiel die Bandpassfilter mit 60 Hz, 100, 150 und 200 Hz vorgesehen sind.

**[0141]** Wünschenswerter Weise gestattet es der Schalter **1562** dem Benutzer, den zu verbessernden Frequenzbereich zu wählen. Ein Benutzer mit einem Lautsprechersystem, das kleine Tieftonlautsprecher, zum Beispiel Woofer von drei bis vier Zoll Durchmesser aufweist, wird im typischen Fall den oberen Frequenzbereich der Bandpassfilter **1312** bis **1315** wählen, die auf 100, 150, 200 und 250 Hz abgestimmt sind. Ein Benutzer mit einem Lautsprechersystem, das etwas größere Woofer von circa 5 Zoll Durchmesser oder mehr aufweist, wird im typischen Fall den niedrigeren Frequenzbereich wählen, den die Bandpassfilter **1560** und **1312** bis **1314** bieten, die auf 60, 100, 150 und 200 Hz abgestimmt sind. Der Fachmann erkennt, dass mehr Schalter vorgesehen werden können, um eine größere Auswahl an Bandpassfiltern und Frequenzbereichen zu erhalten. Die Auswahl verschiedener Bandpassfilter zur Ermöglichung unterschiedlicher Frequenzbereiche ist ein wünschenswertes Verfahren, weil die Bandpassfilter kostengünstig sind und weil verschiedene Bandpassfilter mit einem Schalter mit einem Schaltkontakt gewählt werden können.

#### I. Erweiterung zur Bassverbesserung

**[0142]** [Fig. 16A](#) ist ein Blockschaltbild eines Audiosystems, worin eine Klangverbesserung durch eine Bassverbesserungs-Einheit **1604** vorgesehen ist. Die Bass-Verbesserungseinheit **1604** empfängt Tonsignale von einer Signalquelle **1602**. Bei der Signalquelle **1602** kann es sich um eine beliebige Signalquelle, wie etwa die in [Fig. 1](#) gezeigte Schallquelle **102** oder die in [Fig. 5](#) gezeigte Tonkarte **510** handeln. Die Bass-Verbesserungseinheit **1604** führt eine Signalverarbeitung durch, um die empfangenen Audiosignale in Audioausgangssignale zu modifizieren. Die Audioausgangssignale können an Lautsprecher, Verstärker oder andere Verarbeitungseinrichtungen weitergeleitet werden.

**[0143]** [Fig. 16B](#) ist ein Blockschaltbild, das die Topologie einer Bass-Verbesserungseinheit **1644** mit zwei Kanälen zeigt, die einen ersten Eingang **1609**, einen zweiten Eingang **1611**, einen ersten Ausgang **1617** und einen zweiten Ausgang **1619** aufweist. Der erste Eingang **1609** und der erste Ausgang **1617** entsprechen einem ersten Kanal. Der zweite Eingang **1611** und der zweite Ausgang **1619** entsprechen einem zweiten Kanal. Der erste Eingang **1609** ist mit dem ersten Eingang einer Kombinationseinheit **1610** verbunden und mit einem Eingang eines Signalverarbeitungsblocks **1613**. Ein Ausgang des Signalverarbeitungsblocks **1613** ist mit einem ersten Eingang einer Kombinationseinheit **1614** verbunden. Der zweite Eingang **1611** ist mit einem zweiten Eingang der Kombinationseinheit **1610** und mit einem Eingang eines Signalverarbeitungsblocks **1615** verbunden. Ein Ausgang des Signalverarbeitungsblocks **1615** ist mit einem ersten Eingang einer Kombinationseinheit **1616** verbunden. Ein Ausgang der Kombinationseinheit **1610** ist mit einem Eingang eines Signalverarbeitungsblocks **1612** verbunden. Ein Ausgang des Signalverarbeitungsblocks **1612** ist mit einem zweiten Eingang der Kombinationseinheit **1614** und mit einem zweiten Eingang der Kombinationseinheit **1616** verbunden. Ein Ausgang der Kombinationseinheit **1614** ist mit dem ersten Ausgang **1617** verbunden. Ein Ausgang der zweiten Kombinationseinheit **1616** ist mit dem zweiten Ausgang **1619** verbunden.

**[0144]** Die Signale vom ersten und zweiten Eingang **1609** und **1611** werden kombiniert und durch den Signalverarbeitungsblock **1612** verarbeitet. Der Ausgang des Signalverarbeitungsblocks **1612** ist ein Signal, das bei Kombination mit den Ausgängen der Signalverarbeitungsblöcke **1613** beziehungsweise **1615** die verbesserten Bassausgänge **1617** und **1619** erzeugt.

**[0145]** [Fig. 16C](#) ist ein Blockschaltbild einer weiteren Topologie für ein Bass-Verbesserungssystem **1604** mit zwei Kanälen. In [Fig. 16C](#) ist der erste Eingang **1609** mit dem Eingang eines Signalverarbeitungsblocks **1621** und dem Eingang eines Signalverarbeitungsblocks **1622** verbunden. Ein Ausgang des Signalverarbeitungsblocks **1621** ist mit einem ersten Eingang einer Kombinationseinheit **1625** verbunden und ein Ausgang des Signalverarbeitungsblocks **1622** ist mit einem zweiten Eingang der Kombinationseinheit **1625** verbunden. Der zweite Eingang **1611** ist mit dem Eingang eines Signalverarbeitungsblocks **1623** und mit dem Eingang eines Signalverarbeitungsblocks **1624** verbunden. Ein Ausgang des Signalverarbeitungsblocks **1623** ist mit dem ers-

ten Eingang einer Kombinationseinheit **1626** verbunden und ein Ausgang des Signalverarbeitungsblocks **1624** ist mit einem zweiten Eingang der Kombinationseinheit **1626** verbunden. Ein Ausgang der Kombinationseinheit **1626** ist mit dem ersten Ausgang **1617** verbunden und ein Ausgang der zweiten Kombinationseinheit **1626** ist mit dem zweiten Ausgang **1619** verbunden.

[0146] Anders als bei der in [Fig. 16B](#) gezeigten Topologie werden in [Fig. 16C](#) nicht die zwei Eingangssignale **1609** und **1611** kombiniert, sondern die beiden Kanäle getrennt gehalten und die Verarbeitung zur Tieftonverbesserung in jedem Kanal durchgeführt.

[0147] [Fig. 17](#) ist ein Blockschaltbild **1700** für eine Ausführungsform des in [Fig. 16A](#) gezeigten Bass-Verbesserungssystems. Das Bass-Verbesserungssystem **1700** verwendet eine Bass-Erweiterungseinheit **1720** zur Erzeugung eines zeitabhängigen Verbesserungsfaktors. [Fig. 17](#) kann auch als Ablaufdiagramm für die Beschreibung eines Programms dienen, das auf einer DSP oder einem anderen Prozessor lauffähig ist und die Signalverarbeitungsvorgänge einer Ausführungsform der gegenwärtigen Erfindung implementiert. [Fig. 17](#) zeigt zwei Eingänge, einen Eingang **1702** für den linken Kanal und einen Eingang **1704** für den rechten Kanal. Wie bei den vorhergehenden Ausführungsformen erfolgt die Einteilung links und rechts nur der Einfachheit halber und nicht als Begrenzung. Die Eingänge **1702** und **1704** sind beide an ein Addierglied **1706** angeschlossen, das einen Ausgang als Kombination der zwei Eingänge erzeugt.

[0148] Der Ausgang des Addiergliedes **1706** ist mit einem ersten Bandpassfilter **1712**, einem zweiten Bandpassfilter **1713**, einem dritten Bandpassfilter **1714**, einem vierten Bandpassfilter **1715** und einem fünften Bandpassfilter **1711** verbunden. Der Ausgang von Bandpassfilter **1715** ist am ersten Kontaktpunkt eines einpoligen Umschalters **1716** angeschlossen. Der Ausgang von Bandpassfilter **1711** ist am zweiten Kontaktpunkt des einpoligen Umschalters **1716** angeschlossen. Der Pol des Schalters **1716** ist mit dem Eingang des Addiergliedes **1718** verbunden. Der Ausgang von jedem der Bandpassfilter **1712** bis **1714** ist mit einem getrennten Eingang des Addiergliedes **1718** verbunden.

[0149] Ein Ausgang des Addiergliedes **1718** ist mit einem Eingang der Bass-Erweiterungseinheit **1720** verbunden. Ein Ausgang der Bass-Erweiterungseinheit **1720** ist an einem ersten Kontaktpunkt eines einpoligen Umschalters **1722** angeschlossen. Ein zweiter Kontaktpunkt des einpoligen Umschalters **1722** ist an Masse gelegt. Der Kontaktpunkt des einpoligen Umschalters **1722** ist mit einem ersten Eingang eines Addiergliedes **1724** für den linken Kanal und mit dem ersten Eingang eines Addiergliedes **1732** für den rechten Kanal verbunden. Der Eingang **1702** für den linken Kanal ist an den zweiten Eingang des Addiergliedes **1724** für den linken Kanal gelegt und der Eingang **1704** für den rechten Kanal ist an einen zweiten Eingang des Addiergliedes **1732** für den rechten Kanal gelegt. Die Ausgänge des Addiergliedes **1724** für den linken Kanal und des Addiergliedes **1732** für den rechten Kanal sind mit einem Ausgang **1730** für den linken Kanal und mit einem Ausgang **1733** für den rechten Kanal des Signalverarbeitungsblocks **1700** verbunden. Die Schalter **1722** und **1716** sind wahlweise und sie können durch feste Anschlüsse ersetzt werden.

[0150] Die von den Filtern **1711** bis **1715** und der Kombinationseinheit **1718** durchgeführten Filtervorgänge können zu einem Verbundfilter **1707** kombiniert werden, wie in [Fig. 17](#) gezeigt. Zum Beispiel können in einer alternativen Ausführungsform die Filter **1711** bis **1715** zu einem einzigen Bandpassfilter kombiniert werden, mit einem Passband, das sich von annähernd 40 Hz bis 250 Hz erstreckt. Zur Verarbeitung von Bassfrequenzen erstreckt sich das Passband des Verbundfilters **1707** vorzugsweise von annähernd 20 bis 100 Hz am niedrigen Ende und von annähernd 150 bis 350 Hz am oberen Ende. Das Verbundfilter **1707** kann auch andere Filterübertragungsfunktionen wahrnehmen, wie zum Beispiel als Hochpassfilter, Baugruppenfilter, usw.. Das Verbundfilter kann auch so konfiguriert werden, dass es ähnlich wie eine graphische Entzerrung wirkt und innerhalb des Passbandes einige Frequenzen relativ zu anderen Frequenzen innerhalb des Passbandes abschwächt.

[0151] Wie gezeigt entspricht [Fig. 17](#) annähernd der Topologie von [Fig. 16B](#), wo die Signalverarbeitungsblöcke **1613** und **1615** eine Übertragungsfunktion 1 haben und der Signalverarbeitungsblock **1612** das Verbundfilter **1707** und die Bass-Erweiterungseinheit **1720** enthält. Die in [Fig. 17](#) gezeigte Signalverarbeitung ist jedoch nicht auf die in [Fig. 16B](#) dargestellte Topologie begrenzt. Die Elemente von [Fig. 17](#) können auch in der in [Fig. 16C](#) dargestellten Topologie verwendet werden, wo die Signalverarbeitungsblöcke **1621** und **1623** eine Übertragungsfunktion 1 haben und die Signalverarbeitungsblöcke **1622** und **1624** das Verbundfilter **1707** und die Bass-Erweiterungseinheit **1720** enthalten. Obwohl in [Fig. 17](#) nicht gezeigt, können die Signalverarbeitungsblöcke **1613**, **1615**, **1621** und **1623** auch eine zusätzliche Signalverarbeitung durchführen, wie zum Beispiel als Hochpassfilter zur Entfernung niedriger Bassfrequenzen, als Hochpassfilter zur Entfernung von Frequenzen, die von der Bass-Erweiterungseinheit **1720** verarbeitet werden, für die Hochfrequenzbetonung zur Ver-

besserung der hochfrequenten Töne, als zusätzliche Verarbeitung in mittleren Basslagen zur Ergänzung des Bass-Erweiterungs-Schaltkreises, usw. Auch weitere Kombinationen werden in Betracht gezogen.

[0152] **Fig. 18** ist eine Frequenzbereichsdarstellung, die die allgemeine Form der Übertragungsfunktionen der Bandpassfilter **1711** bis **1715** zeigt. **Fig. 18** zeigt die Übertragungsfunktionen der Bandpassfilter **1801** bis **1805**, die den Bandpassfiltern **1711** bis **1715** entsprechen. Die Transferfunktionen **1801** bis **1805** sind als Bandpassfunktionen bei 50, 100, 150, 200 und 250 Hz dargestellt.

[0153] In einer Ausführungsform ist das Bandpassfilter **1711** auf eine Frequenz unterhalb von 100 Hz, zum Beispiel auf 50 Hz abgestimmt. Wenn sich der Schalter **1718** in einer ersten Position entsprechend dem ersten Schaltkontakt befindet, wählt er das Bandpassfilter **1711** an und wählt das Bandpassfilter **1715** ab, wodurch Bandpassfilter bei Frequenzen von 50, 100, 150 und 200 Hz gewählt werden. Befindet sich der Schalter **1716** in einer zweiten Position, die dem zweiten Schaltkontakt entspricht, dann wählt er das Bandpassfilter ab und wählt das Bandpassfilter **1715** an, womit Bandpassfilter mit Frequenzen von 100, 150, 200 und 250 Hz gewählt werden.

[0154] Somit gestattet es der Schalter **1716** dem Benutzer wünschenswerter Weise, den zu verbessernden Frequenzbereich zu wählen. Ein Benutzer mit einem Lautsprechersystem, das kleine Woofer, wie etwa Woofer mit drei bis vier Zoll Durchmesser enthält, wird im typischen Fall den oberen Frequenzbereich wählen, der durch die Bandpassfilter **1712** bis **1715** geboten wird, die auf 100, 150, 200 und 250 Hz abgestimmt sind. Ein Benutzer mit einem Lautsprechersystem, das etwas größere Woofer, etwa mit einem Durchmesser von fünf Zoll oder mehr, bietet, wird im typischen Fall den niedrigeren Frequenzbereich mit den Bandpassfiltern **1711** bis **1714** wählen, der auf Frequenzen von 50, 100, 150 und 200 Hz abgestimmt ist. Der Fachmann wird erkennen, dass weitere Schalter zum Einsatz kommen könnten, um eine Auswahl von mehr Bandpassfiltern und mehr Frequenzbereichen zu ermöglichen. Die Wahl verschiedener Bandpassfilter für verschiedene Frequenzbereiche ist ein wünschenswertes Verfahren, weil die Bandpassfilter kostengünstig sind und weil verschiedene Bandpassfilter mit einem Schalter mit nur einem Schaltkontakt gewählt werden können.

[0155] In einer Ausführungsform verwendet die Bass-Erweiterungseinheit **1720** einen automatischen Regelverstärker (AGC), der einen linearen Verstärker mit einer internen Servo-Rückkoppelungsschleife enthält. Die Servoeinrichtung stellt automatisch die mittlere Amplitude des Ausgangssignals auf die mittlere Amplitude eines Signals am Reglereingang ein. Die mittlere Amplitude des Reglereingangs erhält man im typischen Fall durch Bestimmung der Hüllkurve des Reglersignals. Das Reglersignal kann auch mit anderen Verfahren bestimmt werden, zum Beispiel durch Tiefpassfilterung, Bandpassfilterung, mit dem Spitzendetektor, Effektivwertmittlung, Mittelwertbildung usw.

[0156] Als Reaktion auf eine Vergrößerung der Amplitude der Hüllkurve des Signals, das auf den Eingang der Bass-Erweiterungseinheit **1720** übertragen wird, erhöht die Servoschleife die Vorwärtsverstärkung der Bass-Erweiterungseinheit **1720**. Umgekehrt erfolgt als Reaktion auf eine Verkleinerung der Amplitude der Hüllkurve des Signals, das auf den Eingang der Bass-Erweiterungseinheit **1720** übertragen wird, eine Erhöhung der Vorwärtsverstärkung der Bass-Erweiterungseinheit **1720** durch die Servoschleife. In einer Ausführungsform erfolgt die Erhöhung der Verstärkung der Bass-Erweiterungseinheit **1720** schneller als die Abnahme der Verstärkung. **Fig. 19** ist eine Zeitbereichsdarstellung zur Veranschaulichung der Verstärkung der Bass-Erweiterungseinheit **1720** als Reaktion auf einen einstufigen Eingang. Der Fachmann erkennt, dass **Fig. 19** die Verstärkung und nicht das Ausgangssignal als Funktion der Zeit darstellt. Die meisten Verstärker haben eine festgelegte Verstärkung und deshalb wird die Verstärkung selten in einem Graphen dargestellt. Der automatische Regelverstärker (AGC) in der Bass-Erweiterungseinheit **1720** variiert die Verstärkung in der Bass-Erweiterungseinheit **1720** jedoch in Abhängigkeit von der Hüllkurve des Eingangssignals.

[0157] Der einstufige Eingang ist als Kurve **1909** und die Verstärkung als Kurve **1902** dargestellt. Im Ansprechen auf die Vorderflanke des Eingangsimpulses **1909** ergibt sich ein Anstieg der Verstärkung während eines Zeitraums **1904**, die einer Konstanten der Anstiegszeit entspricht. Am Ende des Zeitraums **1904** erreicht die Verstärkung einen eingeschwungenen Zustand  $A_0$ . Im Ansprechen auf die Hinterflanke des Eingangsimpulses **1909** fällt die Verstärkung während eines Zeitraums **1906**, der einer Abklingkonstanten **1906** entspricht, auf Null ab.

[0158] Die Konstante der Anstiegszeit **1904** und die Konstante der Abklingzeit **1906** werden in wünschenswerter Weise so gewählt, dass sich eine Verbesserung der Bassfrequenzen ergibt, ohne die übrigen Komponenten des Systems, wie etwa den Verstärker und die Lautsprecher, zu übersteuern. **Fig. 20** ist eine Zeitbereichsdarstellung **2000** einer typischen Bassnote, die auf einem Instrument wie einer Bassgitarre, Basstrom-

mel, einem Synthesizer usw., gespielt wird. Die Darstellung **2000** zeigt einen Abschnitt **2040** mit höherer Frequenz, dessen Amplitude durch einen Abschnitt mit niedrigerer Frequenz mit einer Modulations-Hüllkurve **2042** moduliert wird. Die Hüllkurve **2042** hat einen Anstiegsabschnitt **2046**, gefolgt von einem Abklingabschnitt **2047**, gefolgt von einem Beharrungsabschnitt **2048**, gefolgt von einem Abfallabschnitt **2049**. Die grösste Amplitude der Darstellung **2000** ist eine Spitze **2050**, die an dem Zeitpunkt zwischen dem Anstiegsabschnitt **2046** und dem Abklingabschnitt **2047** eintritt.

[**0159**] Wie bereits erwähnt, ist die Schwingungsform **2044** typisch für viele, wenn nicht sogar die meisten Musikinstrumente. Wenn man zum Beispiel eine Gitarrensaite zupft und loslässt stellen sich am Anfang einige Schwingungen mit großer Amplitude ein, die dann in einen mehr oder weniger gut aufrecht erhaltenen Schwingungszustand übergehen, der dann langsam abklingt. Die Anfangsschwingungen mit großem Schwingweg der Gitarrensaite entsprechen dem Anstiegsabschnitt **2046** und dem Abklingabschnitt **2047**. Die langsam abklingenden Schwingungen entsprechen dem Beharrungszustand **2048** und dem Abfallabschnitt **2049**. Klaviersaiten verhalten sich ähnlich, wenn sie mit dem Hammer einer Pianonote angeschlagen werden.

[**0160**] Klaviersaiten haben vielleicht einen betonteren Übergang vom Beharrungsabschnitt **2048** zum Abfallabschnitt **2049**, weil der Hammer nicht auf die Saite zurückkehrt und auf ihr bleibt, bis die Klaviertaste losgelassen wird. Wird die Klaviertaste während des Beharrungszeitraums **2048** gedrückt gehalten, dann schwingen die Saiten frei mit relativ geringer Dämpfung. Wird die Taste losgelassen, dann legt sich der filzbedeckte Hammer auf die Taste und dämpft die Schwingung der Saite während des Abfallzeitraums **2049** rasch ab.

[**0161**] In ähnlicher Weise erzeugt das Fell einer Trommel beim Anschlagen anfangs eine Reihe von Schwingungen mit großem Schwingweg entsprechend dem Anstiegsabschnitt **2046** und dem Abklingabschnitt **2047**. Nach dem Abklingen der Schwingungen mit großem Schwingweg (dem Ende des Abklingabschnittes **2047** entsprechend) schwingt das Trommelfell weiter über einen Zeitraum, der dem Abschnitt des Beharrungszustandes **2048** und dem Abfallabschnitt **2049** entspricht. Viele Töne von Musikinstrumenten können erzeugt werden, indem nur die Länge der Zeitabschnitte **2046** bis **2049** gesteuert wird.

[**0162**] Wie in Verbindung mit [Fig. 4C](#) beschrieben, wird die Amplitude eines höherfrequenten Signals durch einen Ton mit niedrigerer Frequenz (Hüllkurve) moduliert und somit variiert die Amplitude des höherfrequenten Signals abhängig von der Frequenz des Tons mit niedrigerer Frequenz. Die Nicht-Linearität des Ohres bewirkt eine teilweise Demodulierung des Signals, so dass das Ohr die niederfrequente Hüllkurve des höherfrequenten Signals wahrnimmt und so die Wahrnehmung des niederfrequenten Tons erzeugt, obwohl bei der niedrigeren Frequenz keine tatsächliche akustische Energie erzeugt wurde. Dieser Detektoreffekt kann durch geeignete Signalverarbeitung der Signale im Bereich mittlerer Basslagen im typischen Fall zwischen 50 und 150 Hz am niedrigen Ende und 200 bis 500 Hz am oberen Ende des Bereichs verstärkt werden. Durch geeignete Signalverarbeitung ist es möglich, ein Klangverbesserungssystem zu konstruieren, das die Wahrnehmung niederfrequenter akustischer Energie erzeugt, selbst wenn Lautsprecher verwendet werden, die eine solche Energie gar nicht erzeugen können.

[**0163**] Die Wahrnehmung der tatsächlich in der vom Lautsprecher erzeugten akustischen Energie vorhandenen Frequenzen kann als Effekt erster Ordnung betrachtet werden. Die Wahrnehmung zusätzlicher Oberschwingungen, die in den tatsächlich vorhandenen Frequenzen nicht vorhanden sind, gleich ob diese Oberschwingungen mit einer Verzerrung durch Zwischenmodulation oder durch den Detektoreffekt erzeugt werden, kann als Effekt zweiter Ordnung betrachtet werden.

[**0164**] Ist jedoch die Amplitude der Spitze **2050** zu groß, dann werden die Lautsprecher (und möglicherweise auch der Leistungsverstärker) übersteuert. Eine Übersteuerung der Lautsprecher verursacht eine beträchtliche Verzerrung und kann die Lautsprecher beschädigen.

[**0165**] Die Bass-Erweiterungseinheit **1720** bringt wünschenswerter Weise eine Verbesserung der tiefen Töne im Bereich der mittleren Basslagen und verringert gleichzeitig Effekte der Übersteuerung der Spitze **2050**. Die von der Bass-Erweiterungseinheit **1720** bewirkte Anstiegszeitkonstante **1904** begrenzt die Anstiegszeit der Verstärkung durch die Bass-Erweiterungseinheit **1720**. Die Anstiegszeitkonstante der Bass-Erweiterungseinheit **1720** hat einen relativ geringen Einfluss auf eine Schwingungsform mit kurzer Anstiegszeit **2046** (kurze Anstiegszeit der Hüllkurve).

[**0166**] [Fig. 21A](#) zeigt eine Zeitbereichsdarstellung der Verstärkung der Bass-Erweiterungseinheit **1720** in Relation zu einer Hüllkurve **2104** einer Eingangs-Schwingungsform mit langer Anstiegszeit **2046**. Der Fachmann wird erkennen, dass in [Fig. 21A](#) nur die Hüllkurve **2104** der Eingangs-Schwingungsform dargestellt ist und

nicht die tatsächliche Schwingungsform (die Beziehung zwischen einer tatsächlichen Schwingungsform und ihrer Hüllkurve wird in Verbindung mit [Fig. 4C](#) und [Fig. 20](#) erörtert). Die Eingangs-Schwingungsform mit der Hüllkurve **2104** wird auf die Bass-Erweiterungseinheit **1720** gelegt und diese erzeugt eine Schwingungsform mit der Hüllkurve **2106**. Zum Vergleich ist [Fig. 21C](#) eine Zeitbereichsdarstellung der Verstärkung der Bass-Erweiterungseinheit **1720**. Die Zeitachse von [Fig. 21A](#) ist auf die Zeitachse von [Fig. 21C](#) abgestimmt, um weiter zu veranschaulichen, dass die Anstiegszeit der Hüllkurve **2104** im Vergleich zur Anstiegszeit der Bass-Erweiterungseinheit **1720** lang ist.

**[0167]** Weil die Anhebung der Verstärkung durch die Bass-Erweiterungseinheit **1720**, die durch die Anstiegszeit gesteuert wird, mit dem Anstiegsabschnitt **2104** der Eingangs-Hüllkurve "Schritt halten" kann, hat die Bass-Erweiterungseinheit **1720** außer einer gewissen Verstärkung nur einen relativ geringen Einfluss auf die Form des Anstiegs der Hüllkurve **2104**. Deshalb ist die Ausgangs-Hüllkurve **2106** der Eingangshüllkurve **2104** ähnlich, aber mit einer Anhebung der Verstärkung. Als Ergebnis ist das tatsächliche Ausgangssignal entsprechend der Ausgangshüllkurve **2106** dem tatsächlichen Eingangssignal entsprechend der Eingangshüllkurve **2104** ähnlich, aber mit angehobener Verstärkung.

**[0168]** [Fig. 21B](#) zeigt eine Zeitbereichsdarstellung einer Eingangshüllkurve **2114** mit kurzer Anstiegszeit. Die Eingangshüllkurve **2114** wird auf die Bass-Erweiterungseinheit **1720** gelegt und diese erzeugt eine Ausgangshüllkurve **2116**. Die Zeitachse von [Fig. 21C](#) ist auf die Zeitachse von [Fig. 21A](#) und [Fig. 21B](#) abgestimmt, um weiter zu veranschaulichen, dass die Anstiegszeit der Hüllkurve **2104** im Vergleich zu der Anstiegszeit der Bass-Erweiterungseinheit **1720** kurz ist.

**[0169]** Weil die Anhebung der Verstärkung durch die Bass-Erweiterungseinheit **1720**, die durch die Anstiegszeit gesteuert wird, nicht mit dem Anstiegsabschnitt der Eingangshüllkurve **2114** "Schritt halten" kann, ist die Anstiegszeit der Ausgangshüllkurve **2116** der Anstiegszeit der Eingangs-Schwingungsform **2114** ähnlich. Deshalb ist die maximale Amplitude der Ausgangs-Schwingungsform **2116** der maximalen Amplitude der Eingangs-Schwingungsform **2114** ähnlich. Die Ausgangshüllkurve **2116**, die durch die Anstiegszeit begrenzt ist, schließt wünschenswerter Weise nicht die Verstärkungsanhebung durch die Bass-Erweiterungseinheit **1720** ein, weil die Anstiegszeit der Eingangs-Schwingungsform zu rasch abläuft, als dass die Bass-Erweiterungseinheit **1720** mithalten könnte. Das verringert die Möglichkeit einer Übersteuerung der Verstärker oder Lautsprecher durch die von der Bass-Erweiterungseinheit **1720** bewirkte Anhebung der Verstärkung. Bis jedoch die Eingangshüllkurve **2116** während des Beharrungsabschnittes **2048** einen mehr oder weniger eingeschwungenen Wert erreicht hat, hat die Anhebung der Verstärkung durch die Bass-Erweiterungseinheit **1720** mit der Eingangshüllkurve "aufgeholt" und so ist während des Beharrungsabschnittes die Amplitude der Ausgangskurve **2116** größer als die Amplitude der Eingangshüllkurve **2114**.

**[0170]** Wie in [Fig. 21B](#) gezeigt, entsteht durch die Wirkung der Bass-Erweiterungseinheit **1720** eine relativ stärkere Anhebung der langfristigen Verstärkung, und wünschenswerter Weise eine relativ geringere Anhebung der kurzfristigen Verstärkung, um das Risiko einer Überverstärkung von transienten Schwingungen und Impulsen im Eingangssignal, und einer damit verbundenen Übersteuerung der Lautsprecher zu reduzieren. [Fig. 21B](#) zeigt eine Amplitudenlinie **2118**, die der Amplitude entspricht, bei der die Lautsprecher (und/oder Leistungsverstärker) übersteuert würden. Die Spitzenamplitude der Eingangshüllkurve **2114** ist der Linie **2118** ähnlich, weil die Verstärkung der Bass-Erweiterungseinheit **1720** während der Anstiegszeit noch nicht ihr Maximum erreicht hat.

**[0171]** [Fig. 21D](#) zeigt eine Frequenzbereichsdarstellung für das Ansprechen der Amplitude auf den Schaltkreis **1700** der Bass-Erweiterung. Die Frequenzauswahl durch die Filter **1711** bis **1715** beschränkt die Wirkung der Bass-Erweiterungseinheit **1720** auf einen Frequenzbereich, der vor allem durch eine untere Frequenz  $f_L$  und eine obere Frequenz  $f_H$  begrenzt ist. Die Frequenz unterhalb von  $f_L$  ist ein Abfallbereich. Im Abfallbereich hat der Schaltkreis **1700** der Bass-Erweiterung eine Übertragungsfunktion nahe 1. Der Bereich wird als Abfallbereich bezeichnet, weil im typischen Fall kleine Lautsprecher in diesem Bereich nur wenig akustische Leistung bringen. Der Bereich oberhalb der Frequenz  $f_H$  ist ein Passbandbereich, in welchem der Schaltkreis der Bass-Erweiterung eine Übertragungsfunktion nahe 1 bietet.

**[0172]** Im Verstärkungsbereich bietet der Schaltkreis **1700** der Bass-Erweiterung eine zeitabhängige Verstärkung auf Grund der zeitabhängigen Verstärkung durch die Bass-Erweiterungseinheit **1720**. [Fig. 21D](#) zeigt eine Schar von Verstärkungskurven im Bereich der Verstärkungsfrequenzen, die Eingangssignalen mit unterschiedlicher Anstiegszeit der Hüllkurven entsprechen. Für Eingangssignale mit relativ kurzer Hüllkurven-Anstiegszeit ist die Verstärkung des Schaltkreises **1700** der Bass-Erweiterung im Bereich der Verstärkungsfrequenzen kleiner als bei einem Signal mit langsam veränderlicher Hüllkurve (annähernd eingeschwungener Zustand).

[0173] [Fig. 22](#) ist ein Schaltschema, das eine Ausführungsform des Schaltkreises **1700** der Bass-Erweiterung zeigt. Die Eingänge **1702** und **1704** sind zum ersten und zweiten Anschlusspunkt des Addiergliedes **1706** geführt. Mit den Eingängen **1702** und **1704** können Blockkondensatoren in Serie geschaltet werden, um eine Gleichstromsperre am Eingang des Schaltkreises **1700** der Bass-Erweiterung vorzusehen.

[0174] Der erste Anschlusspunkt des Addiergliedes **1706** entspricht dem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2202** und der zweite Anschlusspunkt des Addiergliedes **1706** entspricht dem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2204**. Der zweite Anschlusspunkt des Widerstandes **2202** und der zweite Anschlusspunkt des Widerstandes **2204** ist mit einem invertierenden Eingang eines Op-Amp **2208** verbunden. Ein nichtinvertierender Ausgang des Op-Amp **2208** ist an Masse gelegt. Ein Ausgang des Op-Amp ist mit einem ersten Anschlusspunkt eines Rückkoppelungswiderstandes **2206** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Rückkoppelungswiderstandes **2206** ist mit dem invertierenden Eingang des Op-Amp **2206** verbunden. Der Ausgang des Op-Amp **2206** entspricht dem Ausgang des Addiergliedes **1706**.

[0175] In einer Ausführungsform sind die Gleichstrom-Blockkondensatoren 4,7 Mikrofardkondensatoren und die Widerstände **2202**, **2204** und **2206** sind 100 kOhm-Widerstände.

[0176] Die Filter **1711** bis **1715** verwenden die in [Fig. 9](#) gezeigte Topologie, mit Einsatz der von Texas Instruments Inc. hergestellten Op-Amps und mit den in Tabelle 3 aufgeführten Widerstandskomponenten.

Filter	Mittenfrequenz (Hz)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)
1711	50	53,6	7,5	105,0
1712	100	31,6	4,53	63,4
1713	150	21,0	3,09	42,46
1714	200	15,8	2,26	31,6
1715	250	12,7	1,82	25,5

[0177] Der Ausgang des Bandpassfilters **1711** ist mit dem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2210** verbunden. Der Ausgang des Bandpassfilters **1715** ist mit dem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2211** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **2210** ist mit dem ersten Schaltkontakt des einpoligen Umschalters **1716** verbunden und ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **2211** ist mit dem zweiten Schaltkontakt des Schalters **1716** verbunden. Der Pol des einpoligen Umschalters **1716** ist an einem ersten Anschlusspunkt des Addiergliedes **1718** angeschlossen. Der erste Anschlusspunkt des Addiergliedes **1718** ist mit einem invertierenden Eingang eines Op-Amp **2220** verbunden.

[0178] Die Ausgänge der Bandpassfilter **1712** bis **1714** sind an einem zweiten, dritten und vierten Eingang des Addiergliedes **1718** angeschlossen. Der erste Eingang des Addiergliedes **1718** entspricht dem ersten Anschlusspunkt des Widerstandes **2210**. Der zweite Eingang des Addiergliedes **1718** entspricht dem ersten Anschlusspunkt des Widerstandes **2212**. Der dritte Eingang des Addiergliedes **1718** entspricht dem ersten Anschlusspunkt des Widerstandes **2214**. Der vierte Anschlusspunkt des Addiergliedes **1718** entspricht dem ersten Anschlusspunkt des Widerstandes **2216**. Ein zweiter Anschlusspunkt von jedem der Widerstände **2210**, **2212**, **2214** und **2216** ist mit einem invertierenden Eingang eines Op-Amp **2220** verbunden. Ein Ausgang des Op-Amp **2220** ist an einem ersten Anschlusspunkt des Rückkoppelungswiderstandes **2218** angeschlossen. Ein zweiter Anschlusspunkt des Rückkoppelungswiderstandes **2218** ist mit dem invertierenden Eingang des Op-Amp **2220** verbunden. Ein nichtinvertierender Eingang des Op-Amp **2220** ist an Masse gelegt. Der Ausgang des Op-Amp **2220** entspricht dem Ausgang des Addiergliedes **1718**. Das Addierglied **1718** kann auch unter Verwendung von zum Beispiel digitaler Signalverarbeitung, Transistoren usw. implementiert werden. Die Bandpassfilter **1711** bis **1715** und das Addierglied **1718** können auch kombiniert werden, indem ein Filter (zum Beispiel ein Bandpassfilter) mit einer ähnlichen Übertragungsfunktion wie die durch Summierung der Reaktion der Bandpassfilter **1711** bis **1715** erzielte Übertragungsfunktion vorgesehen wird.

**[0179]** In einer Ausführungsform sind die Widerstände **2211**, **2212**, **2214** und **2216** 100 k $\Omega$  Widerstände und der Widerstand **2210** ist ein 69,8 k $\Omega$  Widerstand. Der Op-Amp **2220** ist ein TL074 und der Rückkoppelungswiderstand **2218** ist ein 13,0 k $\Omega$  Widerstand. Der Fachmann wird erkennen, dass das Addierglied **1718** eine gewichtete Summe ergibt, worin die Ausgänge der Filter **1712** bis **1715** jeweils mit annähernd 0,13 gewichtet sind und der Ausgang des Filters **1711** mit annähernd 0,186 gewichtet ist. Die Frequenzen des Filters **1711** mit einer Mittenfrequenz von 50 Hz sind mit einer kleineren Amplitude vorgesehen, um eine Übersteuerung eines kleineren Lautsprechers mit großen niederfrequenten Signalen zu vermeiden. Es können auch andere Gewichtungsfunktionen verwendet werden, einschließlich zum Beispiel einer nichtgleichförmigen Gewichtungsfunktion, einer gleichförmigen Gewichtungsfunktion, usw. Die Gewichtungsfunktion kann auch durch den Einsatz von Bandpassfiltern oder anderen Filtern mit einer gewichteten Übertragungsfunktion in Kombination mit einem Addierglied erreicht werden.

**[0180]** Der Pol des einpoligen Umschalters **1722** ist mit dem ersten Eingang des Addiergliedes **1724** für den linken Kanal und mit dem ersten Eingang des Addiergliedes **1732** für den rechten Kanal verbunden. Der erste Eingang des Addiergliedes für den linken Kanal entspricht einem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2230**. Der zweite Eingang des Addiergliedes für den linken Kanal entspricht einem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2232**. Der zweite Anschlusspunkt des Widerstandes **2230** und der zweite Anschlusspunkt des Widerstandes **2232** ist jeweils an einen invertierenden Eingang eines Op-Amp **2236** angeschlossen. Ein nichtinvertierender Eingang des Op-Amp **2236** ist an Masse gelegt. Ein Ausgang des Op-Amp **2236** ist mit einem ersten Anschlusspunkt eines Kondensators **2238**, dem ersten Anschlusspunkt eines Kondensators **2240** und einem ersten Anschlusspunkt eines Rückkoppelungswiderstandes **2234** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Rückkoppelungswiderstandes **2234** ist mit dem invertierenden Eingang des Op-Amp **2236** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Kondensators **2238** und ein zweiter Anschlusspunkt des Kondensators **2240** ist jeweils an den ersten Anschlusspunkt eines Ausgangswiderstandes **2242** angeschlossen. Der erste Anschlusspunkt des Ausgangswiderstandes ist an den Ausgang **1730** für den linken Kanal angeschlossen. Ein zweiter Anschlusspunkt des Ausgangswiderstandes **2242** ist an Masse gelegt.

**[0181]** Der erste Eingang des Addiergliedes für den linken Kanal entspricht einem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2250**. Der zweite Eingang des Addiergliedes für den rechten Kanal entspricht einem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2252**. Ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **2250** und ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **2252** ist jeweils an einen invertierenden Eingang eines Op-Amp **2256** angeschlossen. Ein nichtinvertierender Eingang des Op-Amp **2256** ist an Masse gelegt. Ein Ausgang des Op-Amp **2256** ist an einen ersten Anschlusspunkt eines Kondensators **2258**, einen ersten Anschlusspunkt eines Kondensators **2260** und einen ersten Anschlusspunkt eines Rückkoppelungswiderstandes **2254** angeschlossen. Ein zweiter Anschlusspunkt des Rückkoppelungswiderstandes **2254** ist mit dem invertierenden Eingang des Op-Amp **2256** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Kondensators **2258** und ein zweiter Anschlusspunkt des Kondensators **2260** ist jeweils an den ersten Anschlusspunkt eines Ausgangswiderstandes **2262** angeschlossen. Der erste Anschlusspunkt des Ausgangswiderstandes **2262** ist mit dem Ausgang **1733** für den rechten Kanal verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Ausgangswiderstandes **2262** ist an Masse gelegt.

**[0182]** In einer Ausführungsform sind die Widerstände **2232**, **2234**, **2252** und **2254** 100 k $\Omega$  Widerstände, die Widerstände **2230** und **2250** sind 33,2 k $\Omega$  Widerstände und die Widerstände **2242** und **2262** sind 10 k $\Omega$  Widerstände. Die Kondensatoren **2238** und **2258** sind 4,7  $\mu$ F Kondensatoren und die Kondensatoren **2240** und **2260** sind 0,01  $\mu$ F Kondensatoren. Die Op-Amps **2236** und **2256** sind TL074. Ein Fachmann wird erkennen, dass die Addierglieder **1724** und **1732** jeweils eine gewichtete Summe erzeugen, wobei der erste Eingang von jedem Addierglied eine Gewichtung von annähernd 1,0 hat.

**[0183]** Ein Blockschaltbild von einer Ausführungsform der Bass-Erweiterungseinheit **1720** ist in [Fig. 23](#) als Blockschaltbild **2300** dargestellt und ein entsprechendes Schaltschema ist in [Fig. 24](#) wiedergegeben. In [Fig. 23](#) ist ein Eingang **2303** mit einem ersten Eingang eines Verstärkers **2306** mit fester Verstärkung, einem ersten Eingang eines Verstärkers **2305** mit variabler Verstärkung und einem ersten festen Anschlusspunkt eines Potentiometers **2308** verbunden. Ein zweiter fester Anschlusspunkt des Potentiometers **2308** ist an Masse gelegt und ein Schleifkontakt des Potentiometers **2308** ist mit dem Eingang eines Hüllkurvendetektors **2312** verbunden. Ein Ausgang des Hüllkurvendetektors **2312** ist mit dem Anstiegs-/Abkling-Puffer **2310** verbunden. Ein Ausgang des Anstiegs-/Abkling-Puffers **2310** ist mit einem Reglereingang eines Regelverstärkers **2305** verbunden. Ein Ausgang des Verstärkers **2306** mit fester Verstärkung ist mit einem ersten Eingang eines Ausgangs-Addiergliedes **2307** verbunden und ein Ausgang des Verstärkers **2305** mit variabler Verstärkung ist mit einem zweiten Eingang des Ausgangsaddiergliedes **2307** verbunden. Ein Ausgang des Addiergliedes **2307** ist mit einem Ausgang **2304** einer Bass-Erweiterungseinheit verbunden.

**[0184]** Der Verstärker **2306** mit festgelegter Verstärkung bietet einen vorwärts orientierten Weg mit dem Verstärkungsfaktor 1 zum Ausgangs-Addierglied **2307**. Selbst wenn die Regelverstärkung **2308** bei Null ist, liefert deshalb dieser vorwärts orientierte Weg eine Mindestverstärkung 1 an den Grundsaltkreis **2300** für die Niederfrequenzverstärkung. Das Potentiometer **2308** ist als Spannungsteiler angeschlossen und wählt einen Abschnitt des Eingangssignals an. Der angewählte Abschnitt wird dem Hüllkurvendetektor **2312** zugeführt. Der Ausgang des Hüllkurvendetektors ist ein Signal, das annähernd der Hüllkurve des Eingangssignals entspricht. Das Hüllkurvensignal wird em Anstiegs-/Abkling-Puffer zugeführt. Hat das Hüllkurvensignal eine positive Neigung (Anstiegsflanke), dann liefert der Anstiegs-/Abkling-Puffer ein Signal zur Anhebung der Verstärkung des Regelverstärkers mit einer durch die Anstiegszeitkonstante vorgegebenen Geschwindigkeit. Hat das Hüllkurvensignal eine negative Neigung (Abfallflanke) dann liefert der Anstiegs-/Abkling-Puffer ein Signal zur Reduzierung der Verstärkung des Regelverstärkers mit einer durch die Abklingzeitkonstante vorgegebenen Geschwindigkeit.

**[0185]** Die in [Fig. 23](#) gezeigte Bass-Erweiterungseinheit **2300** ist ein Expander, weil die Verstärkung der Einheit **2300** und damit der Ausgangspegel durch das Eingangssignal geregelt wird. Mit zunehmender mittlerer Amplitude des Eingangssignals nimmt die Verstärkung zu. Umgekehrt nimmt mit abnehmendem mittleren Pegel des Eingangssignals die Verstärkung ab. Die maximale Erweiterung des Eingangssignals wird dann erzeugt, wenn das Potentiometer **2308** so eingestellt ist, dass das gesamte Eingangssignal angewählt und dem Hüllkurvendetektor **2312** zugeführt wird. Die kleinste Erweiterung mit dem Abfall der Verstärkung auf den Faktor 1 erfolgt dann, wenn sich das Potentiometer **2308** in der Position befindet, in der das Eingangssignal überhaupt nicht angewählt wird (das heisst, dass der Eingang zum Hüllkurvendetektor **2312** geerdet ist). Eine Zunahme der Erweiterung erhöht zwar die Wahrnehmung von Basslagen, erhöht aber auch das Risiko einer Übersteuerung der Lautsprecher. Das Potentiometer **2308** wird vorzugsweise so eingestellt, dass sich eine ausreichende Erweiterung des Eingangssignals ergibt, um die Wahrnehmung von Tieftönen zu verbessern, ohne das Risiko einer Übersteuerung der Lautsprecher unnötig zu vergrößern.

**[0186]** [Fig. 24](#) ist ein Schaltschema, das eine Ausführungsform der Bass-Erweiterungseinheit **2300** veranschaulicht. In [Fig. 24](#) ist der Eingang **2303** mit einem ersten Anschlusspunkt eines Kondensators **2442** und mit dem ersten festen Anschlusspunkt des Potentiometers **2308** verbunden. Ein zweiter fester Anschlusspunkt des Potentiometers **2308** ist an Masse gelegt und ein Schleifkontakt des Potentiometers **2308** ist an den ersten Anschlusspunkt eines Kondensators **2406** angeschlossen. Ein zweiter Anschlusspunkt des Kondensators **2406** ist mit einem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2408** verbunden und ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **2408** ist an den Eingang eines Hüllkurvendetektors (Stift **3**) eines Regelverstärker-Schaltkreises **2449** angeschlossen. In einer Ausführungsform ist der Regelverstärker-Schaltkreis **2449** ein NE572, wie in Verbindung mit [Fig. 14](#) und [Tabelle 2](#) erörtert. Ein erster Anschlusspunkt eines Kondensators **2443** für die Anstiegszeit ist mit einem Reglereingang für die Anstiegszeit (Stift **4**) des Regelverstärker-Schaltkreises **2449** verbunden und ein zweiter Anschlusspunkt des Kondensators **2443** für die Anstiegszeit ist an Masse gelegt. Ein erster Anschlusspunkt eines Kondensators **2444** für die Abklingzeit ist mit einem Reglereingang für die Abklingzeit (Stift **2**) des Regelverstärker-Schaltkreises **2449** verbunden und ein zweiter Anschlusspunkt eines Kondensators **2444** für die Abklingzeit ist an Masse gelegt.

**[0187]** Ein zweiter Anschlusspunkt des Kondensators **2442** ist an einen Spannungseingang  $V_{in}$  (Stift **7**) des Regelverstärker-Schaltkreises **2449** angeschlossen und an einen ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2410**. Ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **2410** ist an einem Spannungsausgang  $V_{out}$  (Stift **5**) des Regelverstärker-Schaltkreises **2449** und an einen invertierenden Eingang eines Op-Amp **2447** angeschlossen. Ein nichtinvertierender Eingang des Op-Amp **2447** ist mit einem Anschlusspunkt eines geerdeten Kondensators **2446**, einem nichtinvertierenden Eingang eines Op-Amp **2452** und einem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2445** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **2445** ist mit einem THD-Anschluss (Stift **6**) des Regelverstärker-Schaltkreises **2449** verbunden.

**[0188]** Ein Ausgang des Op-Amp **2447** ist mit dem Ausgang **2304** und einem ersten Anschlusspunkt eines Rückkoppelungswiderstandes **2449** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Rückkoppelungswiderstandes **2449** ist mit dem invertierenden Eingang des Op-Amp **2447** verbunden.

**[0189]** Ein invertierender Eingang des Op-Amp **2452** ist mit einem Anschlusspunkt eines geerdeten Widerstandes **2453** und einem ersten Anschlusspunkt eines Rückkoppelungswiderstandes **2451** verbunden. Ein zweiter Anschlusspunkt des Rückkoppelungswiderstandes **2451** ist mit einem Ausgang des Op-Amp **2452** und einem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2450** verbunden.

**[0190]** In einer Ausführungsform ist das Potentiometer **2308** ein lineares 1,0 k $\Omega$  Potentiometer. Die Kondens-

satoren **2442**, **2406** und **2446** sind 2,2  $\mu\text{F}$  Kondensatoren. Der Kondensator für die Anstiegszeit ist ein 1,0  $\mu\text{F}$  Kondensator und der Kondensator **2444** für die Abklingzeit ist ein 10  $\mu\text{F}$  Kondensator. Der Widerstand **2408** ist ein 3,1 k $\Omega$  Widerstand und der Widerstand **2445** ist ein 1,0 k $\Omega$  Widerstand. Die Widerstände **2453** und **2451** sind 10 k $\Omega$  Widerstände und die Widerstände **2410**, **2449** und **2450** sind 17,4 k $\Omega$  Widerstände.

**[0191]** Der Regelverstärker-Schaltkreis **2449** schließt einen Hüllkurvendetektor **2461**, einen Anstiegs-/Abkling-Puffer **2462** und ein Verstärkungselement **2463** ein. Wie in dem Blockschaltbild [Fig. 23](#) gezeigt, ist ein Ausgang des Hüllkurvendetektors **2461** mit dem Anstiegs-/Abkling-Puffer **2462** verbunden und ein Ausgang des Anstiegs-/Abkling-Puffer **2462** steuert das Verstärkungselement **2463**. Die Konstanten der Anstiegszeit und der Abklingzeit werden durch Widerstands-Kapazitäts- (RC) Glieder geregelt. Der Anstiegs-/Abkling-Puffer **2462** weist einen internen 10 k $\Omega$  Widerstand für das Anstiegs-RC-Glied und einen 10 k $\Omega$  Widerstand für das Abkling-RC-Glied auf. Der 1,0  $\mu\text{F}$  Kondensator **2443** für den Anstieg erzeugt eine Anstiegszeitkonstante von annähernd 40 ms. Der 10  $\mu\text{F}$  Kondensator **2444** für die Abklingzeit erzeugt eine Abklingzeitkonstante von annähernd 400 ms. In anderen Ausführungsformen kann die Anstiegszeitkonstante zwischen 5 ms und 400 ms liegen und die Abklingzeitkonstante zwischen 100 ms und 1000 ms.

**[0192]** Das Verstärkungselement **2463** ist einem elektronisch veränderbaren Widerstand ähnlich und es wird in Verbindung mit dem Op-Amp **2447** verwendet, um die Verstärkung des Op-Amp **2447** zu variieren. Der Op-Amp **2452** weist eine Gleichstrom-Vorspannung auf. Der Vorwärtsweg mit dem Verstärkungsfaktor 1 wird durch den Widerstand **2410** dargestellt.

**[0193]** Die Bass-Erweiterungseinheit **1720** bewirkt auch eine Modifizierung und Verbesserung der Audio-Schwingungsform durch Verbesserung der Oberschwingungen einiger niederfrequenter Töne und durch Verbesserung der Grundschwingungen anderer niederfrequenter Töne. Durch Verbesserung der Oberschwingungen einiger niederfrequenter Töne nutzt die Bass-Erweiterungseinheit **1720** die Art und Weise, wie das menschliche Ohr Obertöne und Oberschwingungen der niederfrequenten Töne verarbeitet, um die Wahrnehmung zu erzeugen, dass die niederfrequenten Töne von einem Lautsprecher wiedergegeben werden. Die Bass-Erweiterungseinheit **1720** erzeugt die Wahrnehmung, dass der Lautsprecher viele niederfrequente Töne erzeugt, sogar niederfrequente Töne, die von den Lautsprechern nur schlecht wiedergegeben werden. Zusätzlich bewirkt die Bass-Erweiterungseinheit **1720** langfristig eine relativ höhere Verstärkung, während die kurzfristige Verstärkung in wünschenswerter Weise relativ geringer ist, um das Risiko einer Überverstärkung von transienten Schwingungen und Impulsen im Eingangssignal und eine damit verbundene Übersteuerung der Lautsprecher zu reduzieren. Auf eine Zunahme des Eingangssignals über die Zeit spricht die Bass-Erweiterungseinheit **1720** mit einer höheren Verstärkung in Übereinstimmung mit einer Anstiegszeitkonstanten an. Auf eine Abnahme des Eingangssignals über die Zeit spricht die Bass-Erweiterungseinheit **1720** mit einer Abnahme der Verstärkung in Übereinstimmung mit einer Abklingzeitkonstanten an. Die Wirkung der Anstiegszeitkonstanten und der Abklingzeitkonstanten dient zur Reduzierung der Verstärkung von kurzfristigen Zunahmen des Eingangssignals und damit des Risikos einer Übersteuerung der Lautsprecher.

## II. Bass-Erweiterung mit Spitzenkomprimierung

**[0194]** Wie in [Fig. 20](#) und [Fig. 21B](#) gezeigt, beginnt der Anstiegsabschnitt einer vom einem Bassinstrument (zum Beispiel einer Bassgitarre) gespielten Note oft mit einem Anfangsimpuls mit relativ großer Amplitude. Diese Spitze kann in einigen Fällen den Lautsprecher oder mehrere Lautsprecher übersteuern, dadurch einen verzerrten Klang und möglicherweise eine Beschädigung der Lautsprecher verursachen. Der Prozessor zur Verbesserung der Tieftönen bewirkt eine Abflachung der Spitzen im Bass-Signal bei gleichzeitiger Erhöhung der Energie des Bass-Signals und dadurch insgesamt eine verstärkte Wahrnehmung der Basstöne.

**[0195]** Die Energie in einem Signal ist eine Funktion der Amplitude des Signals und der Dauer des Signals. Anders gesagt ist die Energie proportional zur Fläche unter der Hüllkurve des Signals. Obwohl der Anfangsimpuls einer Bassnote eine relativ große Amplitude haben kann, enthält dieser Impuls wegen seiner kurzen Dauer oft wenig Energie. Deshalb trägt der Anfangsimpuls mit seiner geringen Energie oft nicht signifikant zur Bass-Wahrnehmung bei. Deshalb kann die Amplitude des Anfangsimpulses gewöhnlich reduziert werden, ohne die Bass-Wahrnehmung signifikant zu beeinträchtigen.

**[0196]** [Fig. 25](#) ist ein Blockschaltbild eines Bass-Verbesserungssystems **2500**, das zur Bass-Verbesserung eine Spitzenkomprimierung einsetzt, um die Amplitude der Impulse, wie etwa des Anfangsimpulses einer Bassnote zu regeln. Im System **2500** ist eine Spitzenverdichtung **2502** zwischen der Kombinationseinheit **1718** und der Bass-Erweiterungseinheit **1720** eingefügt. Der Ausgang der Kombinationseinheit **1718** ist mit dem Eingang des Spitzenverdichters **2502** verbunden und ein Ausgang des Spitzenverdichters **2502** ist mit dem Ein-

gang der Bass-Erweiterungseinheit **1720** verbunden.

**[0197]** Die vorstehenden Kommentare zu [Fig. 17](#) und zu [Fig. 16B](#) und [Fig. 16C](#) gelten auch für die Topologie von [Fig. 25](#). Zum Beispiel entspricht [Fig. 25](#) annähernd der Topologie von [Fig. 16B](#), wo die Signalverarbeitungsblöcke **1613** und **1615** die Übertragungsfunktion 1 haben und der Signalverarbeitungsblock **1612** das Verbundfilter **1707**, den Spitzenverdichter **2502** und die Bass-Erweiterungseinheit **1720** enthält. Die in [Fig. 25](#) gezeigte Signalverarbeitung ist jedoch nicht auf die Topologie von [Fig. 16B](#) begrenzt. Die Elemente von [Fig. 25](#) können auch in der Topologie von [Fig. 16C](#) zum Einsatz kommen. Obwohl in [Fig. 25](#) nicht gezeigt, können die Signalverarbeitungsblöcke **1613**, **1615**, **1621** und **1623** eine zusätzliche Signalverarbeitung bieten, wie zum Beispiel eine Hochpassfilterung zur Entfernung niedriger Bassfrequenzen, eine Hochpassfilterung zur Entfernung von Frequenzen, die von der Bass-Erweiterungseinheit **1702** und dem Verdichter **2502** verarbeitet werden, eine Hochfrequenzbetonung zur Verbesserung der hochfrequenten Töne, eine zusätzliche Verarbeitung der mittleren Basstonlagen zur Ergänzung der Bass-Erweiterungseinheit **1720** und des Spitzenverdichters **2502**, usw. Weitere Kombinationen werden ebenfalls in Betracht gezogen.

**[0198]** Die Spitzenverdichtungseinheit **2502** flacht die Hüllkurve des Signals am Eingang ab. Für Eingangssignale mit einer großen Amplitude wird die scheinbare Verstärkung der Verdichtungseinheit **2502** reduziert. Für Eingangssignale mit kleiner Amplitude wird die scheinbare Verstärkung der Verdichtungseinheit **2502** erhöht. Somit reduziert die Verdichtungseinheit **2502** die Spitzen der Hüllkurve des Eingangssignals (und füllt die Täler in der Hüllkurve des Eingangssignals auf). Ungeachtet des am Eingang der Verdichtungseinheit **2502** vorhandenen Signals hat die Hüllkurve des Ausgangssignals der Verdichtungseinheit **2502** (das heisst die mittlere Amplitude) eine relativ gleichförmige Amplitude.

**[0199]** [Fig. 26](#) zeigt in einer Zeitbereichsdarstellung den Einfluss des Spitzenverdichters auf eine Hüllkurve mit einem Anfangsimpuls von relativ großer Amplitude. [Fig. 26](#) zeigt eine Zeitbereichsdarstellung einer Eingangshüllkurve **2614** mit einem hohen Anfangsamplituden-Impuls, gefolgt von einer längeren Periode eines Signals mit kleinerer Amplitude. Eine Ausgangshüllkurve **2616** zeigt den Einfluss der Bass-Erweiterungseinheit **1720** auf die Eingangshüllkurve **2614** (ohne den Spitzenverdichter **2502**). Eine Ausgangshüllkurve **2617** zeigt den Einfluss der Weiterleitung des Eingangssignals **2614** über den Spitzenverdichter **2502** und über die Bass-Erweiterung **1720**. Wie in [Fig. 26](#) gezeigt, reicht die Annahme der Amplitude des Eingangssignals **2614** aus, um den Verstärker oder den Lautsprecher zu übersteuern. Die Bass-Erweiterungseinheit begrenzt nicht die maximale Amplitude des Eingangssignals **2614** und deshalb reicht das Ausgangssignal **2616** auch aus, um den Verstärker oder Lautsprecher zu übersteuern.

**[0200]** Die Impuls-Verdichtereinheit **2502**, die in Verbindung mit dem Signal **2617** verwendet wird, komprimiert die Impulse mit großer Amplitude (reduziert ihre Amplitude). Die Verdichtereinheit **2502** stellt den großen Schwingweg der Amplitude des Eingangssignals **2614** fest und komprimiert (verkleinert) die maximale Amplitude so, dass das Ausgangssignal **2617** weniger anfällig für eine Übersteuerung des Verstärkers oder des Lautsprechers ist.

**[0201]** Weil die Verdichtereinheit **2502** die maximale Amplitude des Signals reduziert, ist es möglich, die von der Bass-Erweiterungseinheit **1720** vorgesehene Verstärkung zu erhöhen, ohne die Wahrscheinlichkeit, dass das Ausgangssignal den Verstärker oder Lautsprecher übersteuert, signifikant zu reduzieren. Das Signal **2617** entspricht einer Ausführungsform, bei der die Verstärkung der Bass-Erweiterungseinheit **1720** erhöht wurde. Deshalb hat das Signal **2617** während des langen Abklingabschnittes eine größere Amplitude als die Kurve **2616**.

**[0202]** Wie vorstehend beschrieben ist die Energie in den Signalen **2614**, **2616** und **2617** proportional der Fläche unter der Kurve, die das jeweilige Signal darstellt. Das Signal **2617** hat mehr Energie, weil trotz der kleineren maximalen Amplitude eine größere Fläche unter der Kurve, die das Signal **2617** darstellt, vorhanden ist, als im Fall der Signale **2614** oder **2616**. Weil das Signal **2617** mehr Energie enthält, nimmt ein Zuhörer im Signal **2617** mehr Bass wahr.

**[0203]** Somit gestattet der Einsatz des Spitzenverdichters in Kombination mit der Bass-Erweiterungseinheit **1720** ein Bass-Verbesserungssystem, das mehr Energie im Bass-Signal bietet und dabei die Wahrscheinlichkeit einer Übersteuerung von Verstärker oder Lautsprechern durch das verbesserte Signal reduziert.

**[0204]** Spitzenverdichter sind nach dem Stand der Technik bekannt. Zum Beispiel offenbart ein Datenblatt für die vorstehend erörterte Komponente NE572 einen Verdichtungs-Schaltkreis (allerdings einen ziemlich komplizierten Schaltkreis).

[0205] **Fig. 27** ist ein Blockschaltbild einer Ausführungsform eines Schaltkreises **2700** für einen Spitzenverdichter mit einem Eingang **2703** und einem Ausgang **2704**. Das Signal am Signalausgang **2704** ist eine komprimierte Version des Signals am Eingang **2703**. In einer neuartigen Kombination bietet der Spitzenverdichter **2700** eine Verdichtung durch einen Expander. Dieser im Verdichter **2700** verwendete Erweiterungs-Schaltkreis ist dem für den Bass-Erweiterungsschaltkreis **2300** verwendeten Expander ähnlich.

[0206] In einem Expander, wie der in **Fig. 24** gezeigten Einheit, ist das gesamte (das heisst erweiterte) Ausgangssignal die Summe aus dem Eingangssignal und einem Erweiterungssignal. Mit der Vergrößerung der Amplitude des Eingangssignals wird die Amplitude des Erweiterungssignals größer und damit wird auch der Ausgang (die Summe der beiden) größer. Im Gegensatz dazu entspricht das Ausgangssignal des Verdichters **2700** dem Eingangssignal minus dem Erweiterungssignal. Wird das Eingangssignal größer, dann wird auch das Erweiterungssignal größer, aber die Differenz zwischen den beiden (der Verdichterausgang) wird kleiner. Dies liegt in der Natur eines Verdichters, wenn das Eingangssignal größer wird, vermindert sich die scheinbare Verstärkung des Verdichters. Bei Eingangssignalen mit relativ kleiner Amplitude hat der Verdichter eine relativ hohe Verstärkung. Dagegen hat der Verdichter bei Eingangssignalen mit relativ großer Amplitude eine relativ geringe Verstärkung.

[0207] In **Fig. 27** ist der Eingang **2703** mit dem Eingang eines invertierenden Expanders **2708** und mit dem ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2716** verbunden. Ein Ausgang des invertierenden Expanders **2708** ist an einen ersten Anschlusspunkt eines Widerstandes **2718** angeschlossen.

[0208] Ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **2716** und ein zweiter Anschlusspunkt des Widerstandes **2718** ist jeweils an einen invertierenden Eingang eines Op-Amp **2720** angeschlossen. Ein Rückkopplungswiderstand **2722** ist zwischen dem invertierenden Eingang des Op-Amp **2720** und einem Ausgang des Op-Amp **2720** angeschlossen. Ein nichtinvertierender Eingang des Op-Amp **2720** ist an Masse gelegt. Der Ausgang des Op-Amp **2720** ist mit dem Ausgang **2704** verbunden.

[0209] Der invertierende Expander **2708** ist ein Expander mit einem Expandereingang und einem Expander-Ausgang, der auf den Expandereingang bezogen invertiert (negiert) ist. Ein nichtinvertierender Expander kann ebenfalls verwendet werden, indem man den Eingang (oder den Ausgang) des Expanders über einen invertierenden Verstärker schaltet. Die Anstiegs- und Abklingzeitkonstanten sind vorzugsweise ähnlich wie die Anstiegs- und Abklingzeitkonstanten der Bass-Erweiterungseinheit **1720**. In einer Ausführungsform umfasst der Expander **2708** den in **Fig. 24** gezeigten Expander **2300**.

[0210] Der invertierende Eingang des Operationsverstärker **2720** ist tatsächlich ein Summenpunkt, an dem das (über den Widerstand **2716** zugeführte) Eingangssignal zum erweiterten Signal (über den Widerstand **2718** geschaltet) "addiert" wird. Eine Subtraktion erfolgt am Summenpunkt, weil der Ausgang des Expanders **2708** auf den Expandereingang bezogen negiert ist. Somit ist der Ausgang des Verdichters **2700** eine gewichtete Summe des Eingangssignals (gewichtet durch den Widerstand **2716**) abzüglich des erweiterten Signals (gewichtet durch den Widerstand **2718**). Wenn der Widerstand **2716** als R1 und der Widerstand **2718** als R2 bezeichnet wird, muss R1 im typischen Fall größer als R2 sein.

#### Weitere Ausführungsformen

[0211] Bestimmte spezifische Ausführungsformen der Erfindung wurden beschrieben, aber diese Ausführungsformen sind nur beispielshalber aufgeführt und nicht zur Begrenzung des Anwendungsbereichs der gegenwärtigen Erfindung gedacht. So ist die gegenwärtige Erfindung zum Beispiel nicht auf die Ausführungsformen begrenzt, in denen die Eingangskanäle zu einem kombinierten Kanal zusammengefasst sind, der dann so modifiziert wird, dass er den verbesserten Bass erzeugt. Es ist keine Kombination der Kanäle erforderlich und die Verarbeitung des Verbesserungssignals kann auch auf den getrennten Eingangskanälen erfolgen. Verschiedene Ausführungsformen verwenden Biquad und Tschebyscheff-Filter, aber die Erfindung ist nicht auf diese Filteranordnungen begrenzt. Es können auch andere Filter verwendet werden. Ferner kann die Filterung auch durch Kombination von Tiefpass- und Hochpassfiltern anstatt der beschriebenen Bandpassfilter erfolgen.

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung (**1300**) zur Tonfrequenzverbesserung, aufweisend:  
eine erste Kombinationseinheit (**1306**) zur Kombination von mindestens einem Abschnitt eines ersten Signals (**1302**) mit mindestens einem Abschnitt eines zweiten Signals (**1304**) zur Erzeugung eines kombinierten Signals;

einen ersten Signalprozessor (**1310**), der zur Wahl eines Abschnittes des kombinierten Signals konfiguriert ist, um ein gewähltes Signal zu erzeugen;  
 einen zweiten Signalprozessor (**1312, 1313, 1314, 1315, 1316, 2317, 1318, 1319, 1320**), der zur Modifizierung des gewählten Signals konfiguriert ist, um ein modifiziertes Signal (**1321**) zu erzeugen;  
 eine zweite Kombinationseinheit (**1324**) zur Kombination des modifizierten kombinierten Signals (**1321**) mit dem ersten Signal (**1302**), um ein Ausgangssignal (**1323**) zu erzeugen;  
 und **dadurch gekennzeichnet**, dass der zweite Signalprozessor zur Modifizierung des gewählten Signals auf die Hüllkurve des gewählten Signals anspricht, um das modifizierte Signal (**1321**) zu erzeugen.

2. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Signalprozessor (**1312, 1313, 1314, 1315, 1316, 2317, 1318, 1319, 1320**) einen automatischen Regelverstärker aufweist.

3. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Signalprozessor (**1312, 1313, 1314, 1315, 1316, 2317, 1318, 1319, 1320**) Frequenzen in einem zweiten Frequenzbereich relativ zu den Frequenzen in einem ersten Frequenzbereich verbessert.

4. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Signalprozessor (**1310**) eine Vielzahl von Filtern aufweist.

5. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Signalprozessor (**1310**) eine Vielzahl von Bandpassfiltern aufweist.

6. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Signalprozessor (**1312, 1313, 1314, 1315, 1316, 2317, 1318, 1319, 1320**) eine Erweiterung (**1720**) aufweist, deren Verstärkung in Relation zu einer Konstanten der Anstiegszeit (**1904**) zunimmt.

7. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Verstärkung in Relation zu einer Konstanten der Abklingzeit (**1906**) abnimmt.

8. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Konstante der Anstiegszeit (**1904**) länger dauert, als die Konstante der Abklingzeit (**1906**).

9. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Konstante der Anstiegszeit (**1904**) annähernd 5-50 Millisekunden beträgt.

10. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Signalprozessor (**1312, 1313, 1314, 1315, 1316, 2317, 1318, 1319, 1320**) eine Erweiterung (**1720**) aufweist.

11. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Signalprozessor (**1312, 1313, 1314, 1315, 1316, 2317, 1318, 1319, 1320**) eine Verdichtung (**2502**) aufweist.

12. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Verdichtung (**2502**) eine Erweiterung (**2708**) aufweist.

13. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Verdichtung (**2502**) ferner eine Kombinationseinheit aufweist, die so konfiguriert ist, dass sie einen Ausgang der Erweiterung (**1720**) und einen Eingang der Erweiterung (**1720**) kombiniert, um ein komprimiertes Signal zu erzeugen.

14. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Signalprozessor (**1312, 1313, 1314, 1315, 1316, 2317, 1318, 1319, 1320**) eine Verdichtung (**2502**) und eine Erweiterung (**1720**) aufweist.

15. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Signalprozessor (**1310**) einen Schalter mit einer ersten Position und einer zweiten Position aufweist, wobei die erste Position so konfiguriert ist, dass mindestens ein erster Abschnitt des kombinierten Signals gewählt wird, um das gewählte Signal zu erzeugen und wobei die zweite Position so konfiguriert ist, dass mindestens ein zweiter Abschnitt des kombinierten Signals gewählt wird, um das gewählte Signal zu erzeugen.

16. Vorrichtung (**1300**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Signalprozessor (**1310**) einen Schalter aufweist, der so konfiguriert ist, dass ein Ausgang von einem oder mehreren Bandpassfiltern

gewählt wird, um einen Abschnitt des gewählten Signals zu erzeugen.

17. Verfahren zur Verbesserung der Tieftonlagen in einem Tonsignal, beinhaltend die Schritte der Bereitstellung eines Tonsignals (**1302**);  
Trennung des niederfrequenten Anteils vom Tonsignal (**1310**);  
Filterung des niederfrequenten Anteils, um ein gefiltertes Signal (**1312, 1313, 1314, 1315**) zu erhalten;  
Verstärkung des gefilterten Signals, um ein verstärktes Signal (**1316, 1317, 1318, 1319**) zu erhalten;  
Erzeugung eines simulierten niederfrequenten Signals durch Kombination des Tonsignals (**1304**) mit dem verstärkten Signal (**1321**); und  
dadurch gekennzeichnet, dass die Verstärkung des Verstärkungsreglers (**1316, 1317, 1318, 1319**) in Relation zur Hüllkurve des gefilterten Signals steht.

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt der Filterung die Filterung des niederfrequenten Anteils in einer Vielzahl von Bandpassfiltern beinhaltet.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorgang der Filterung ferner die Gewichtung des Ausgangs von jedem Bandpassfilter beinhaltet.

20. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärkungsschritt die Verdichtung (**2502**) des gefilterten Signals beinhaltet.

21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärkungsschritt ferner die Erweiterung (**1720**) des gefilterten Signals beinhaltet.

Es folgen 31 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

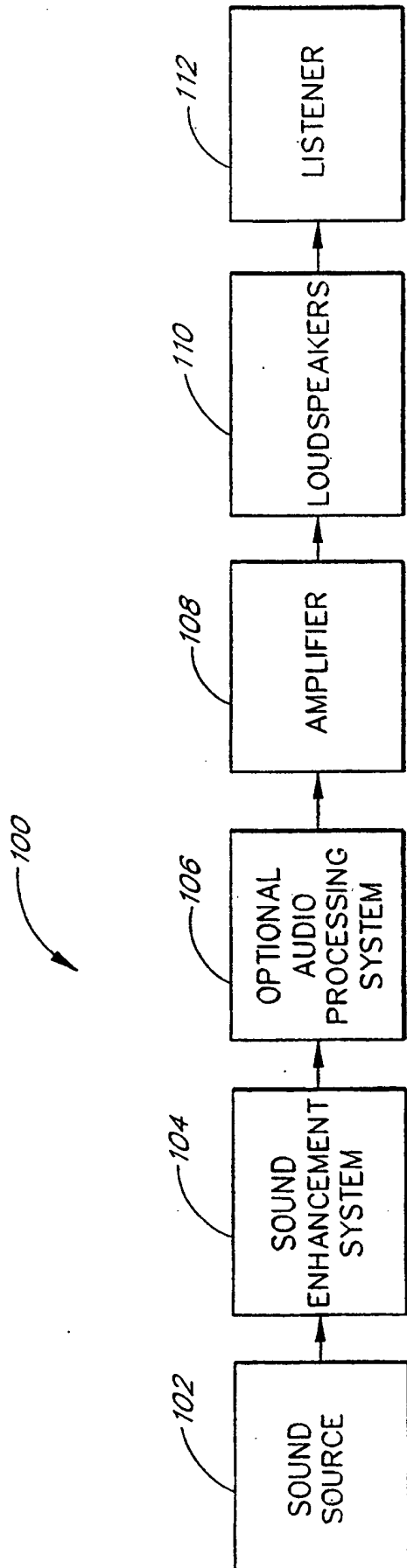


FIG. 1

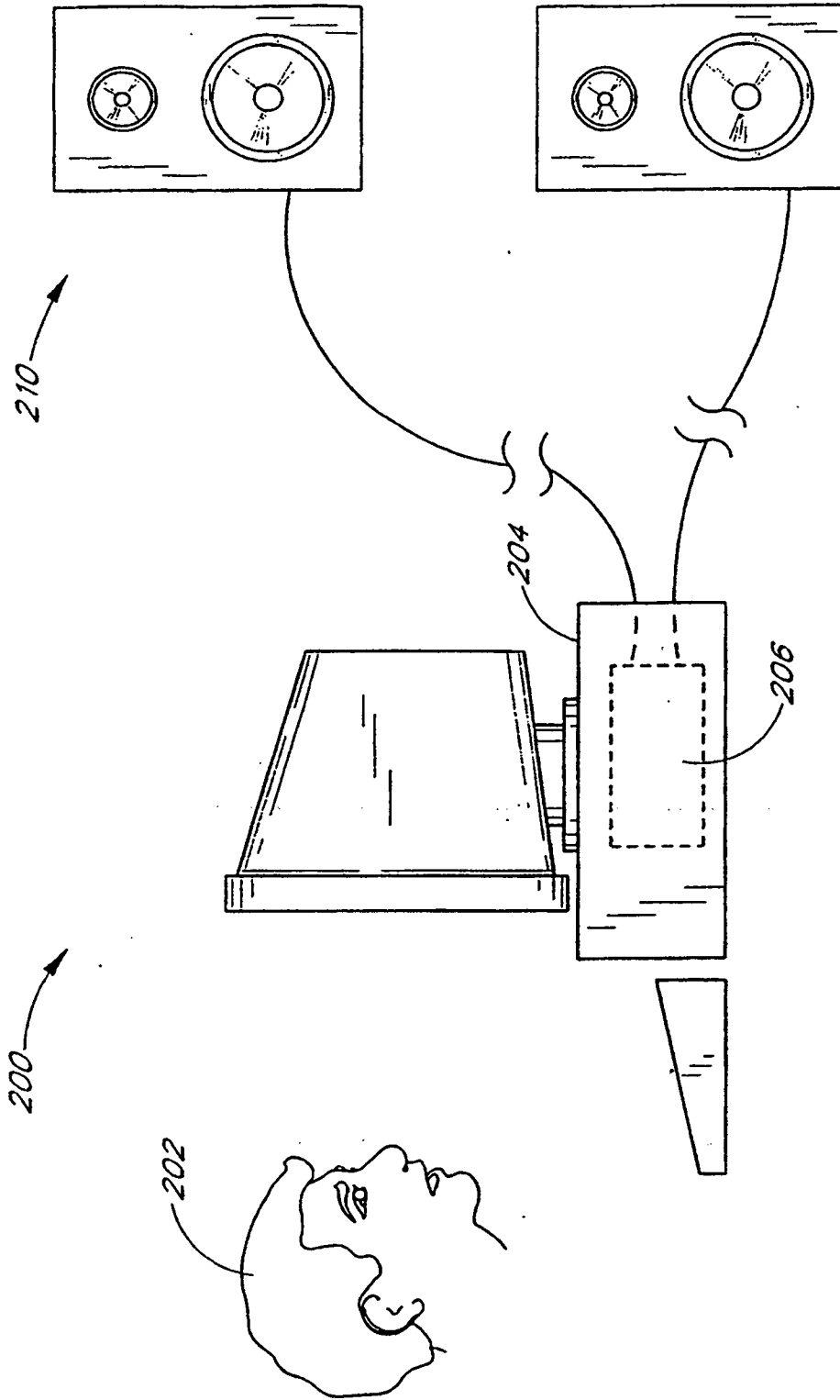


FIG. 2

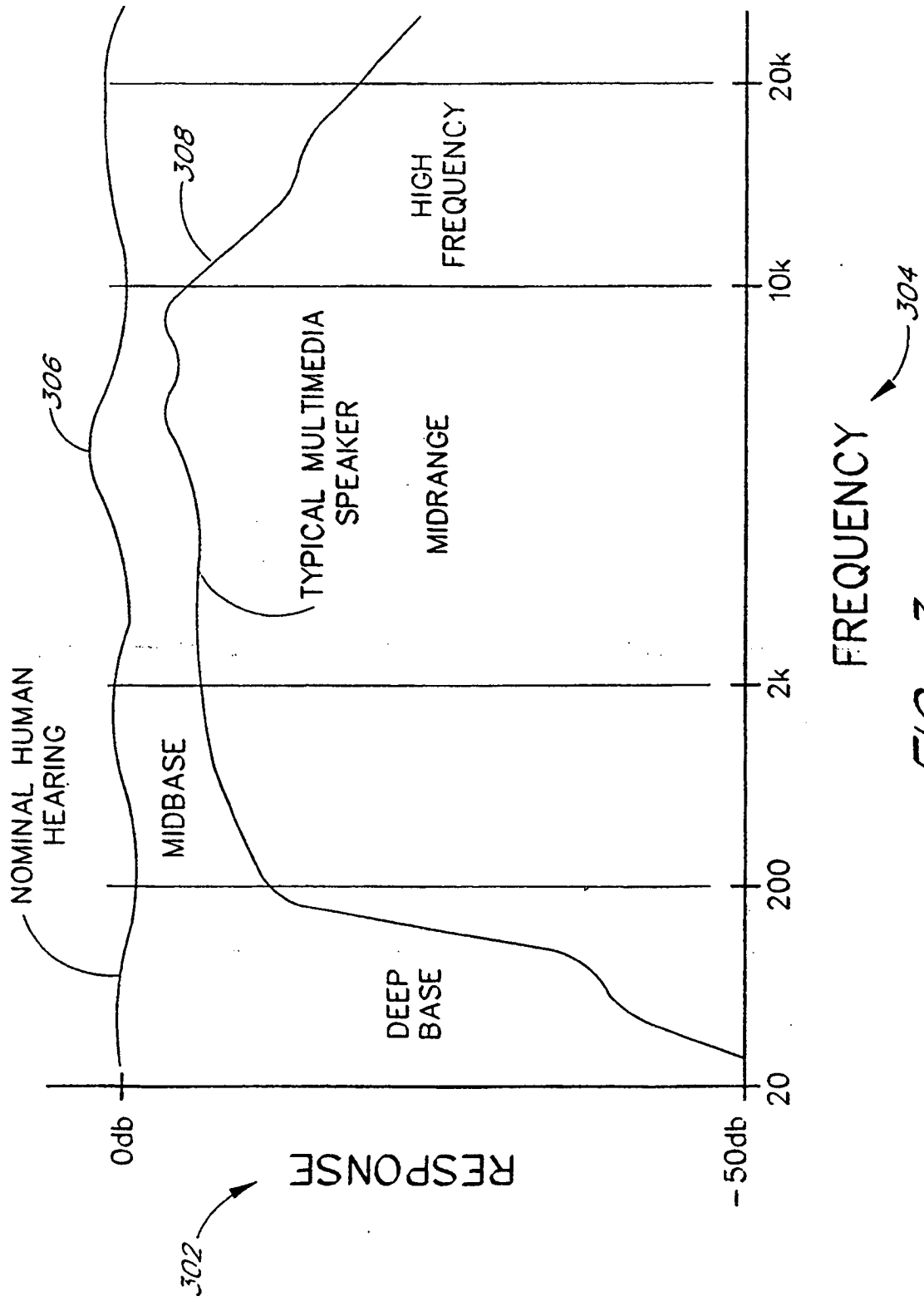


FIG. 3

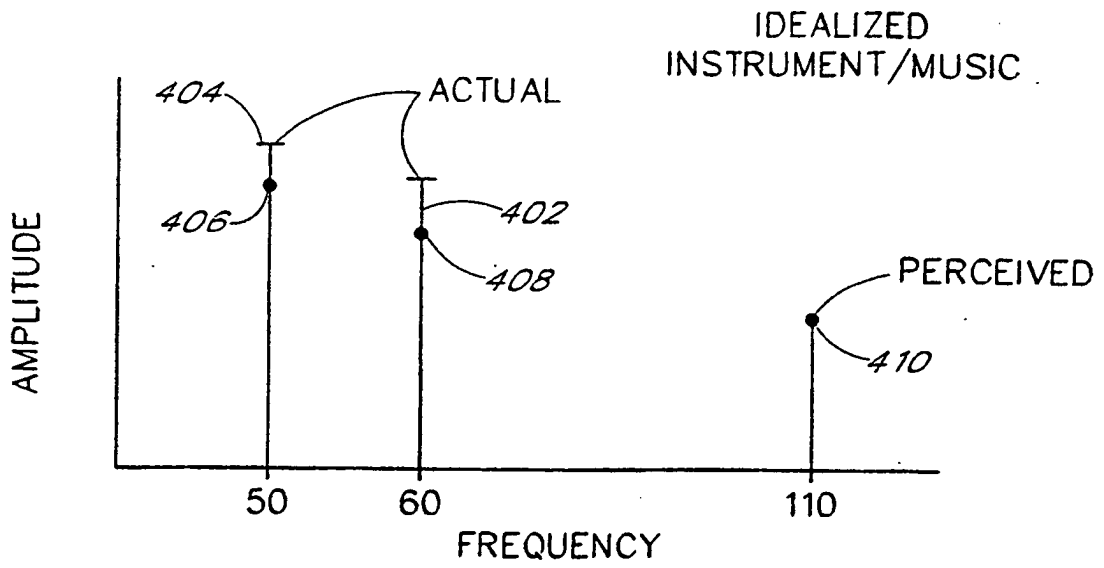


FIG. 4A

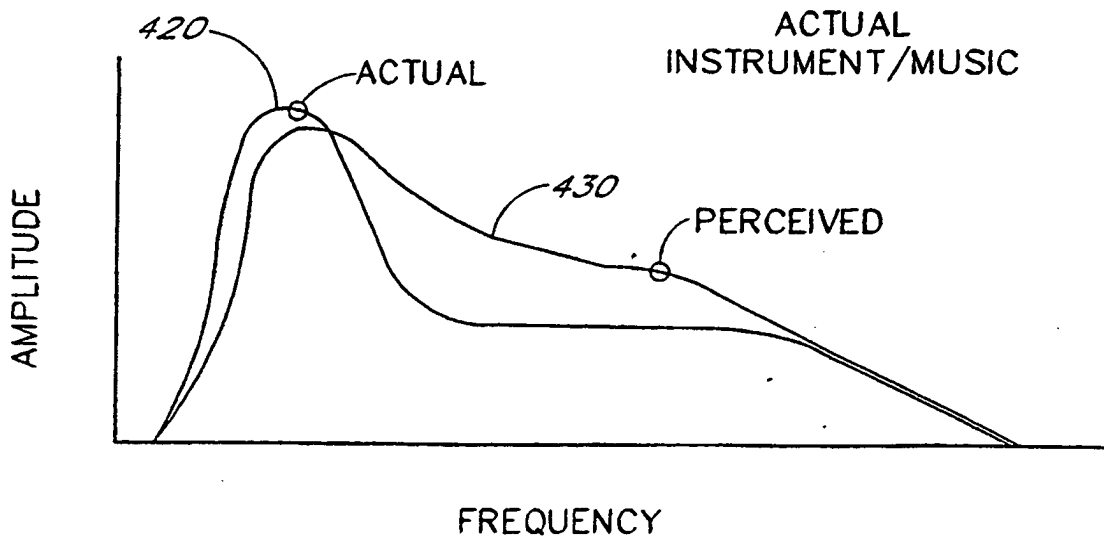


FIG. 4B

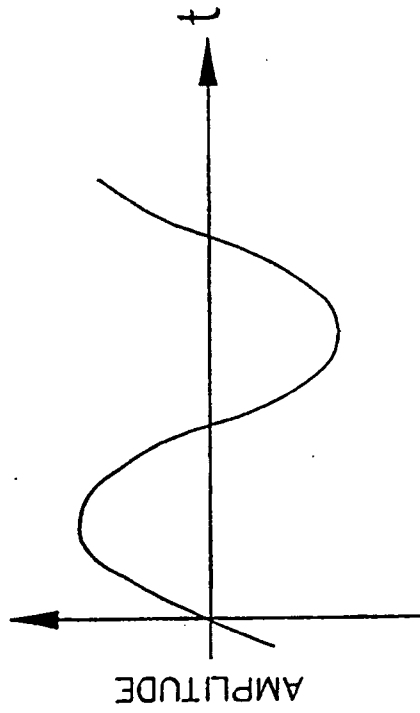


FIG. 4D

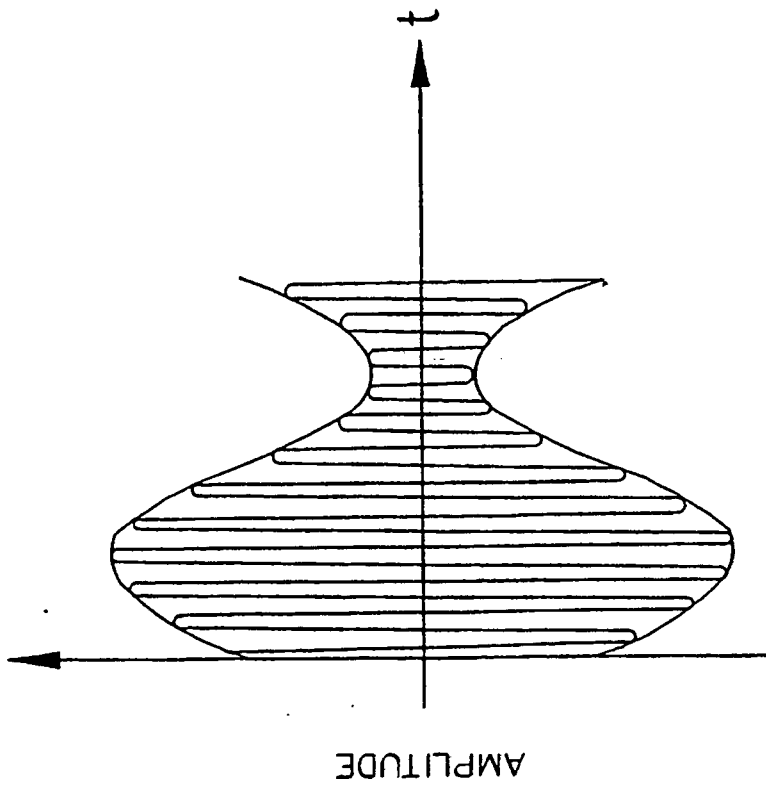
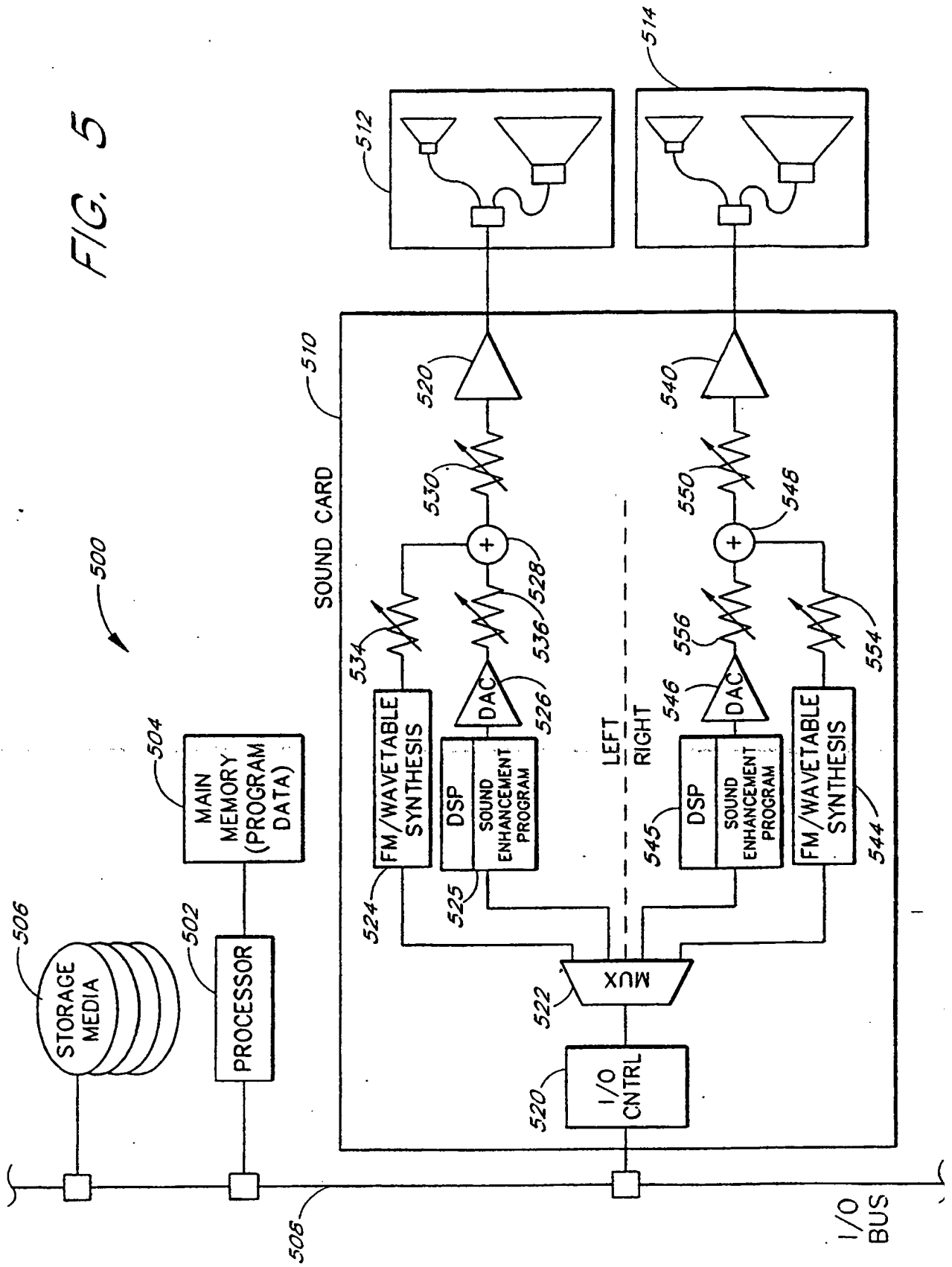
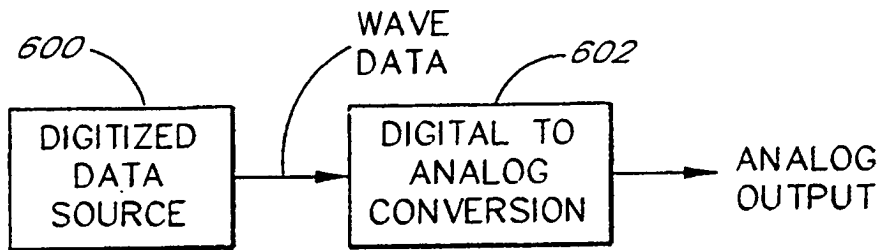


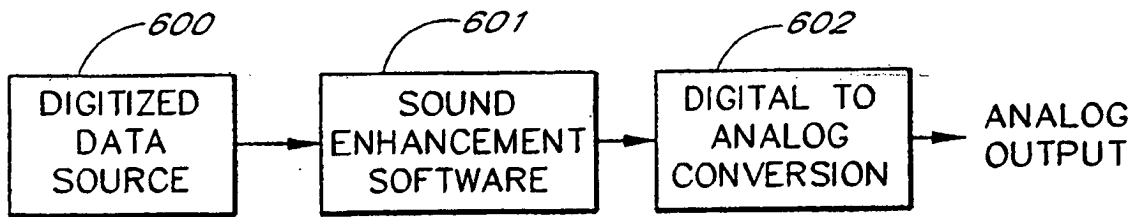
FIG. 4C

FIG. 5





*FIG. 6A*  
(PRIOR ART)



*FIG. 6B*

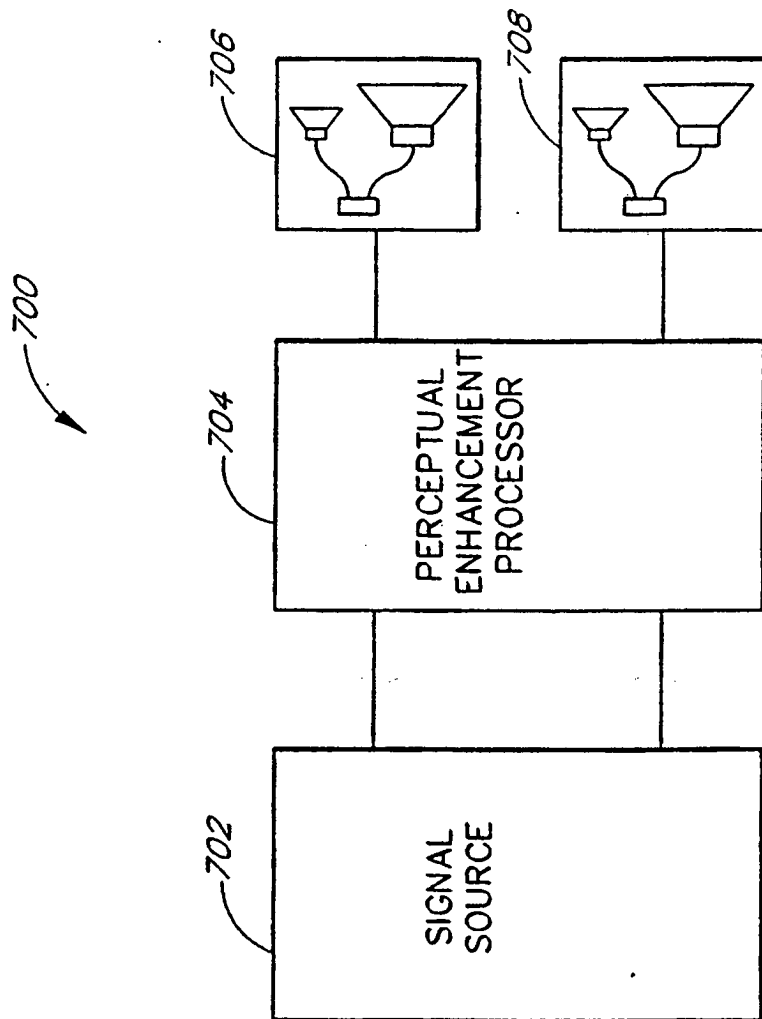


FIG. 7

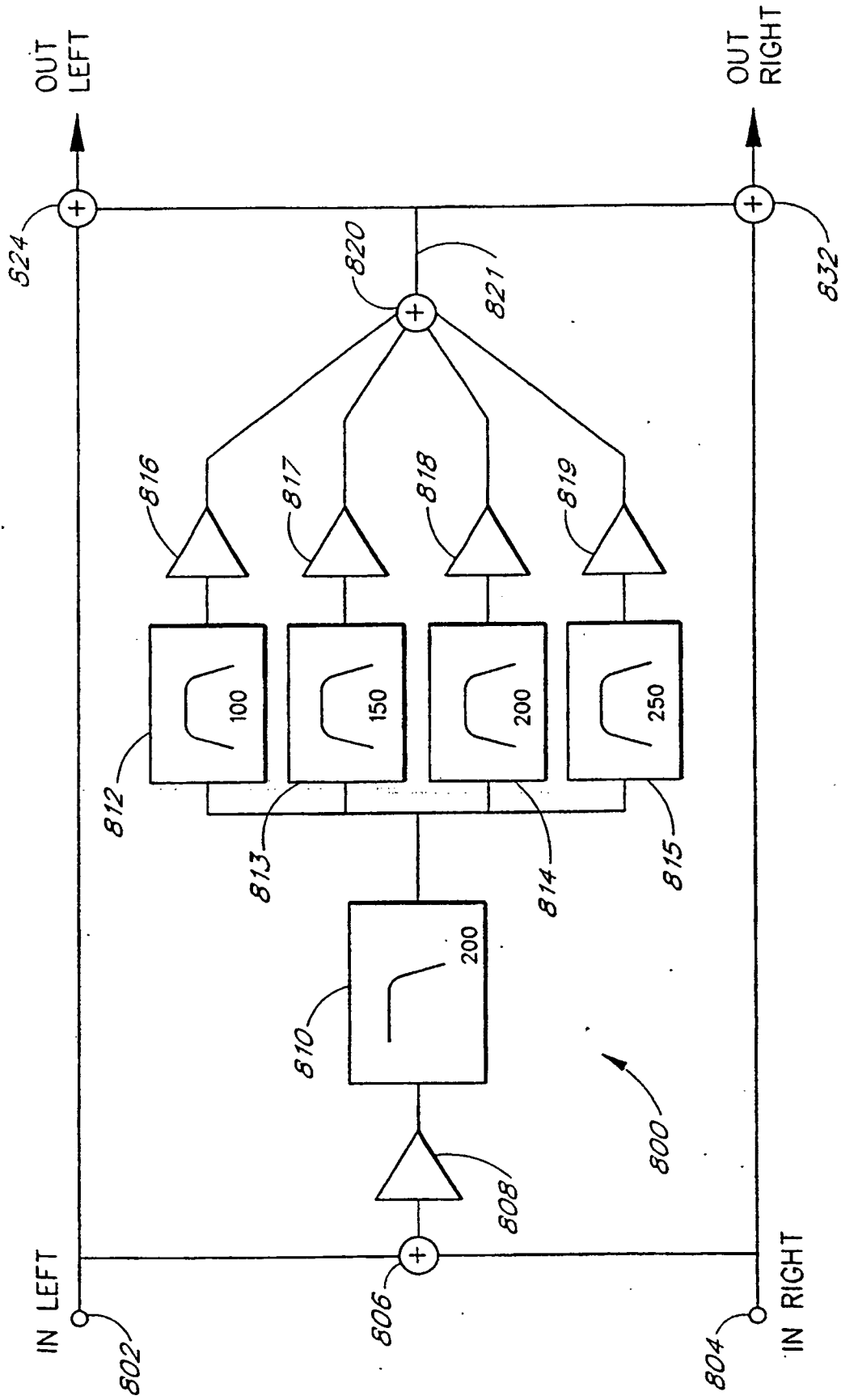


FIG. 8

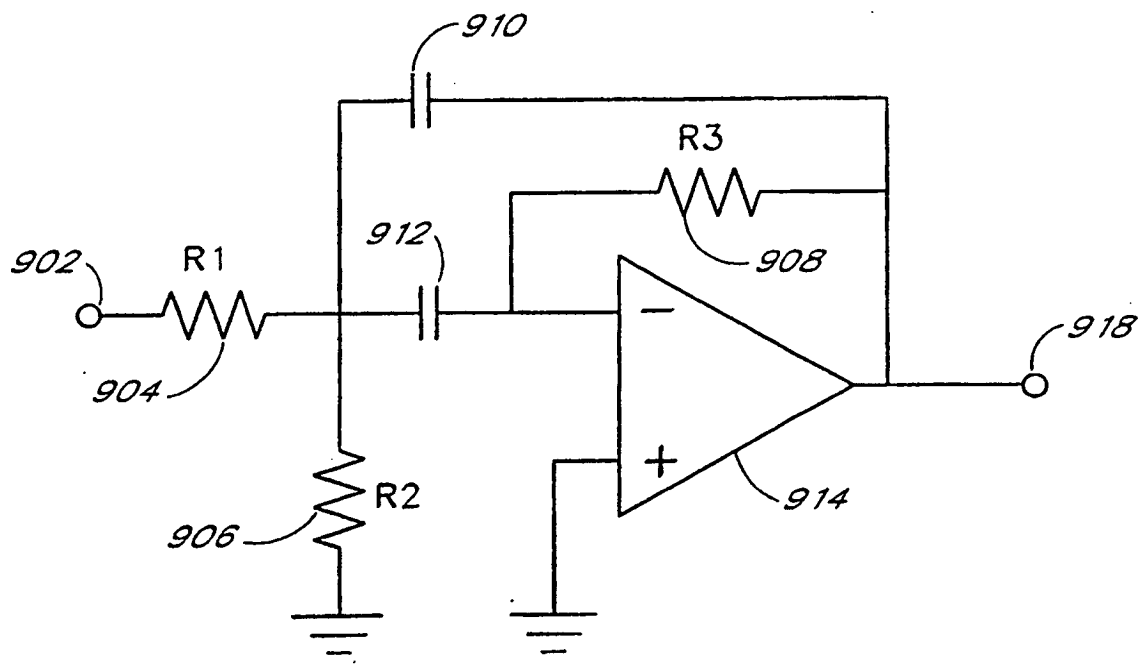


FIG. 9

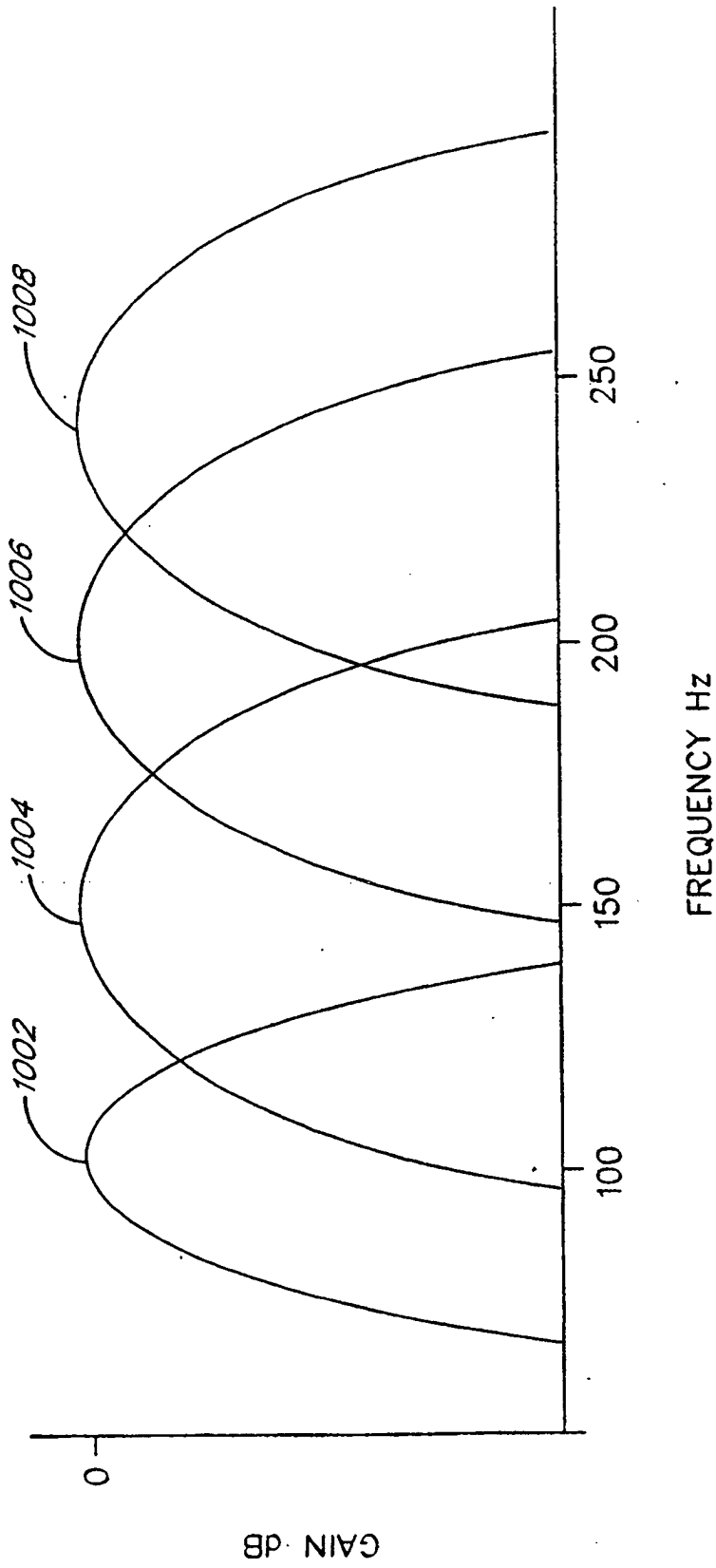


FIG. 10

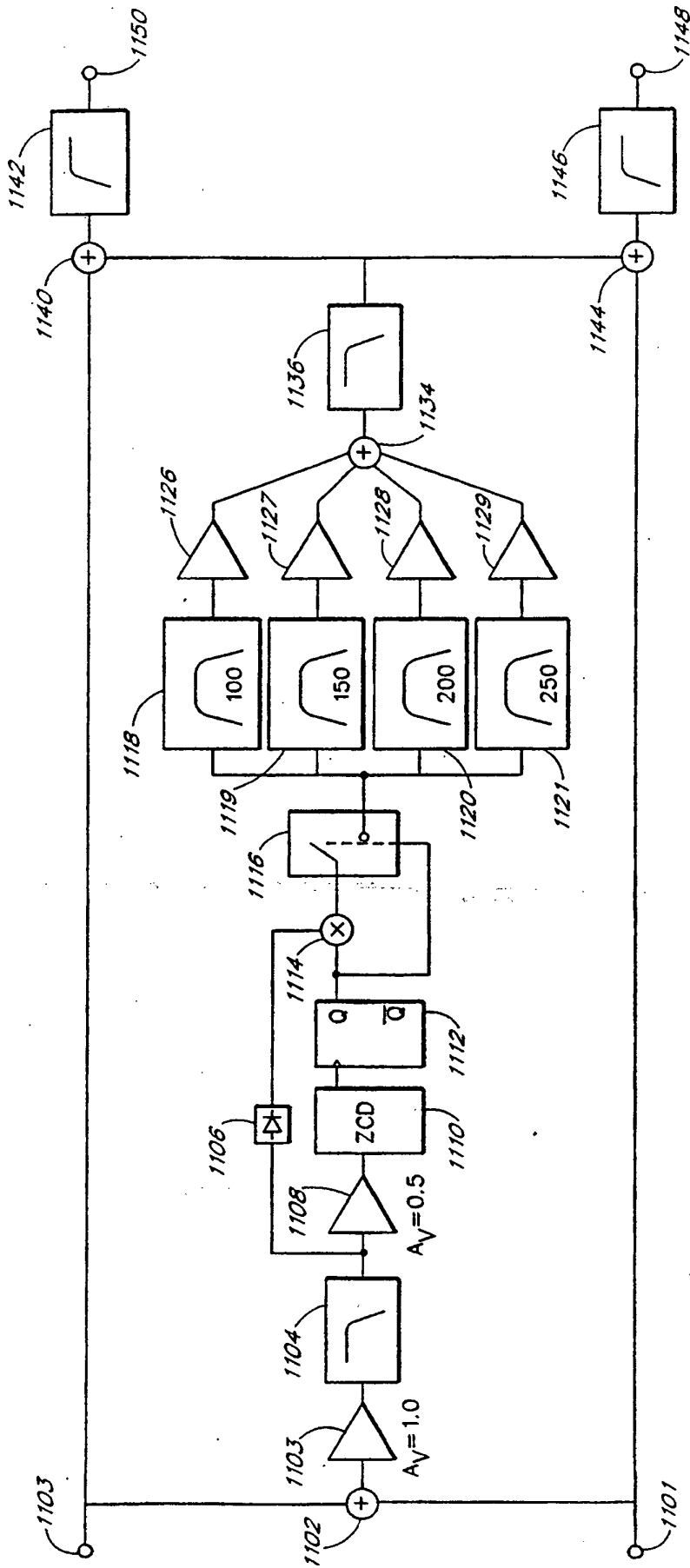


FIG. 11

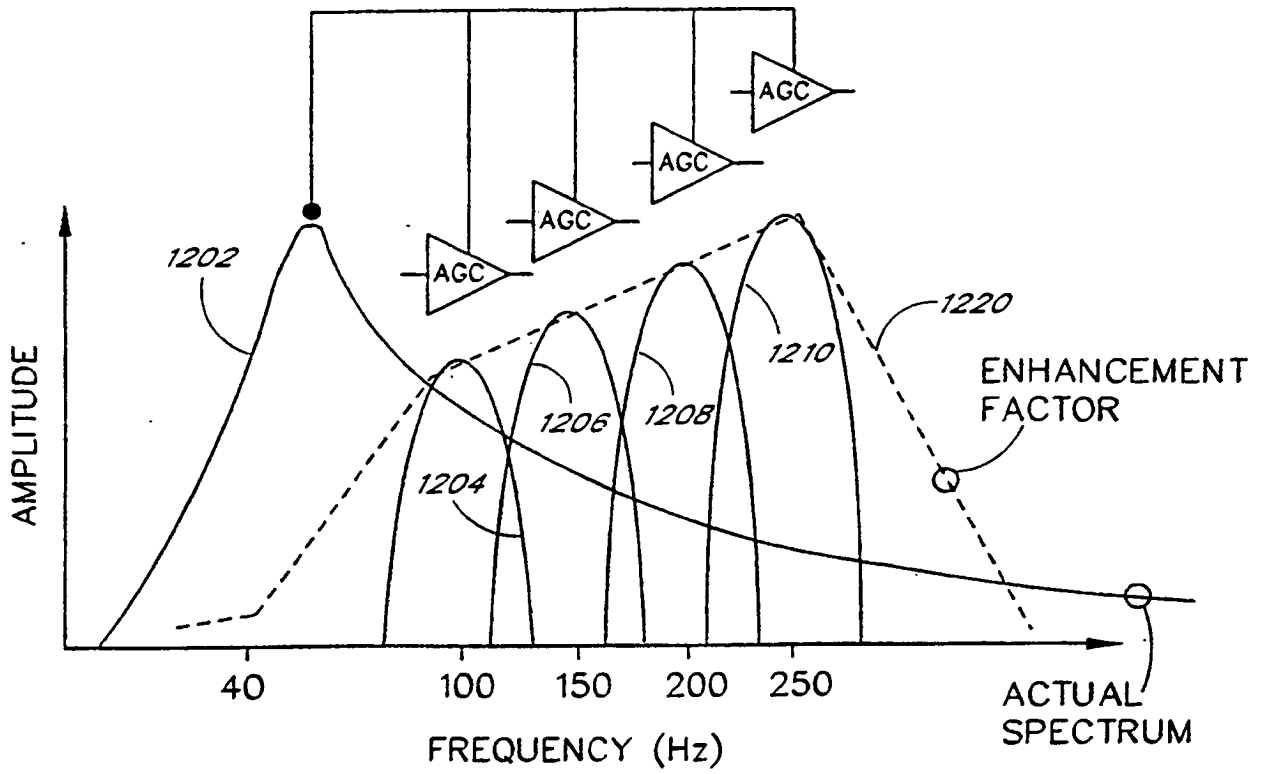


FIG. 12A

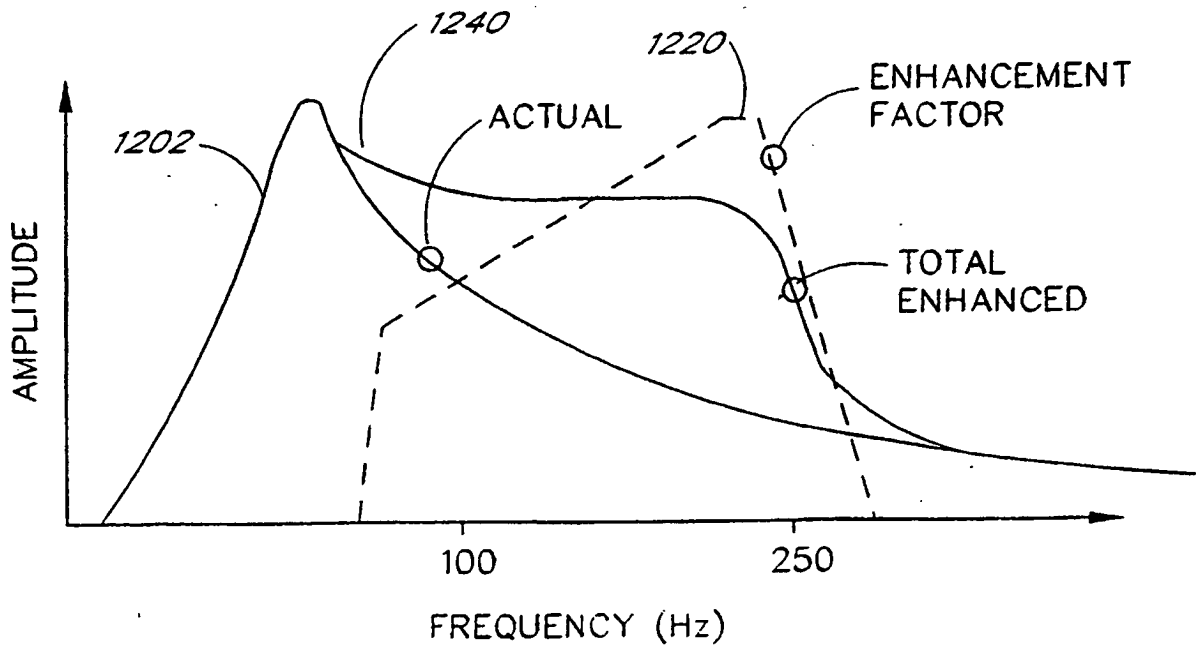


FIG. 12B

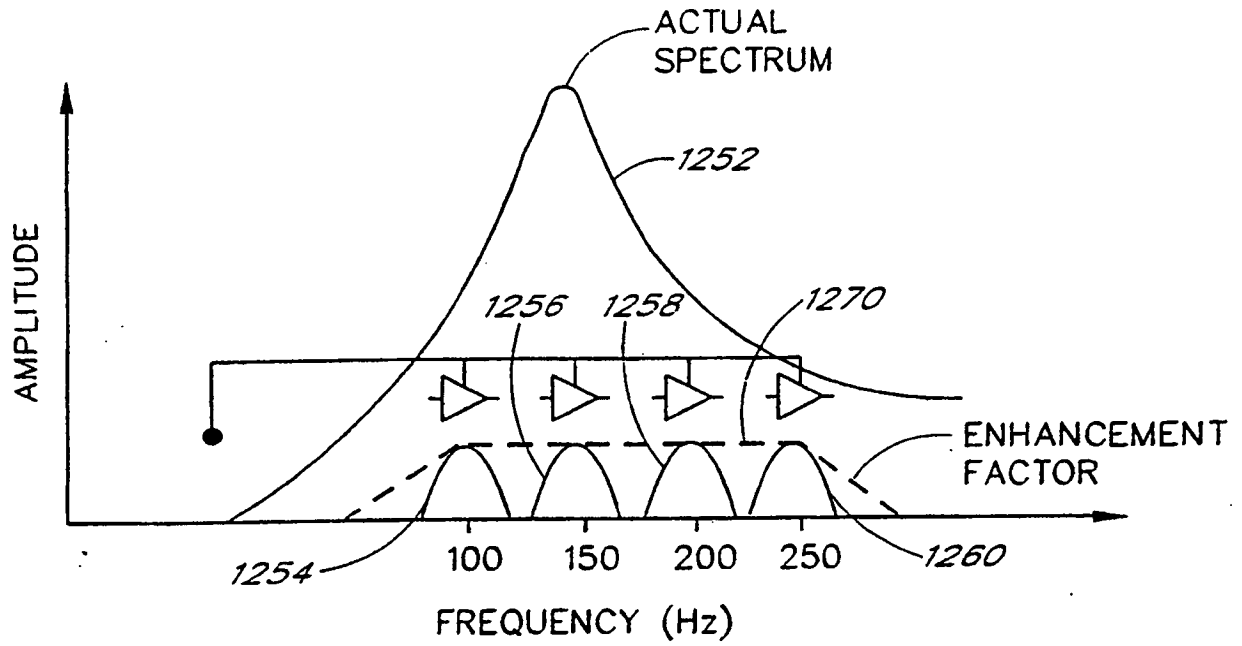


FIG. 12C

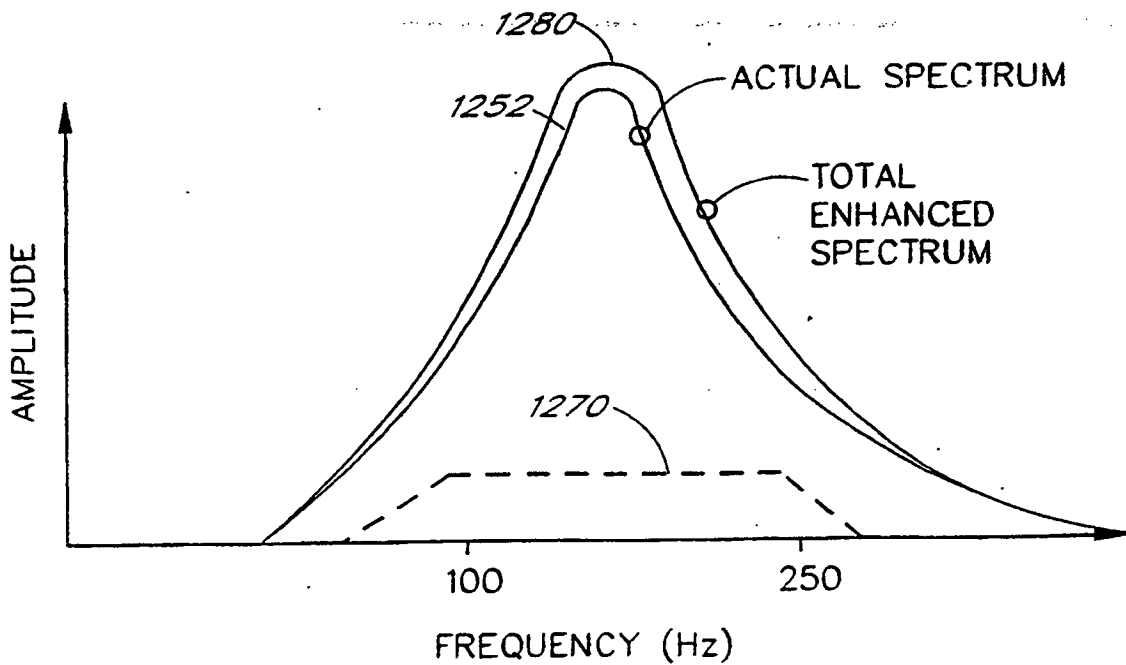


FIG. 12D

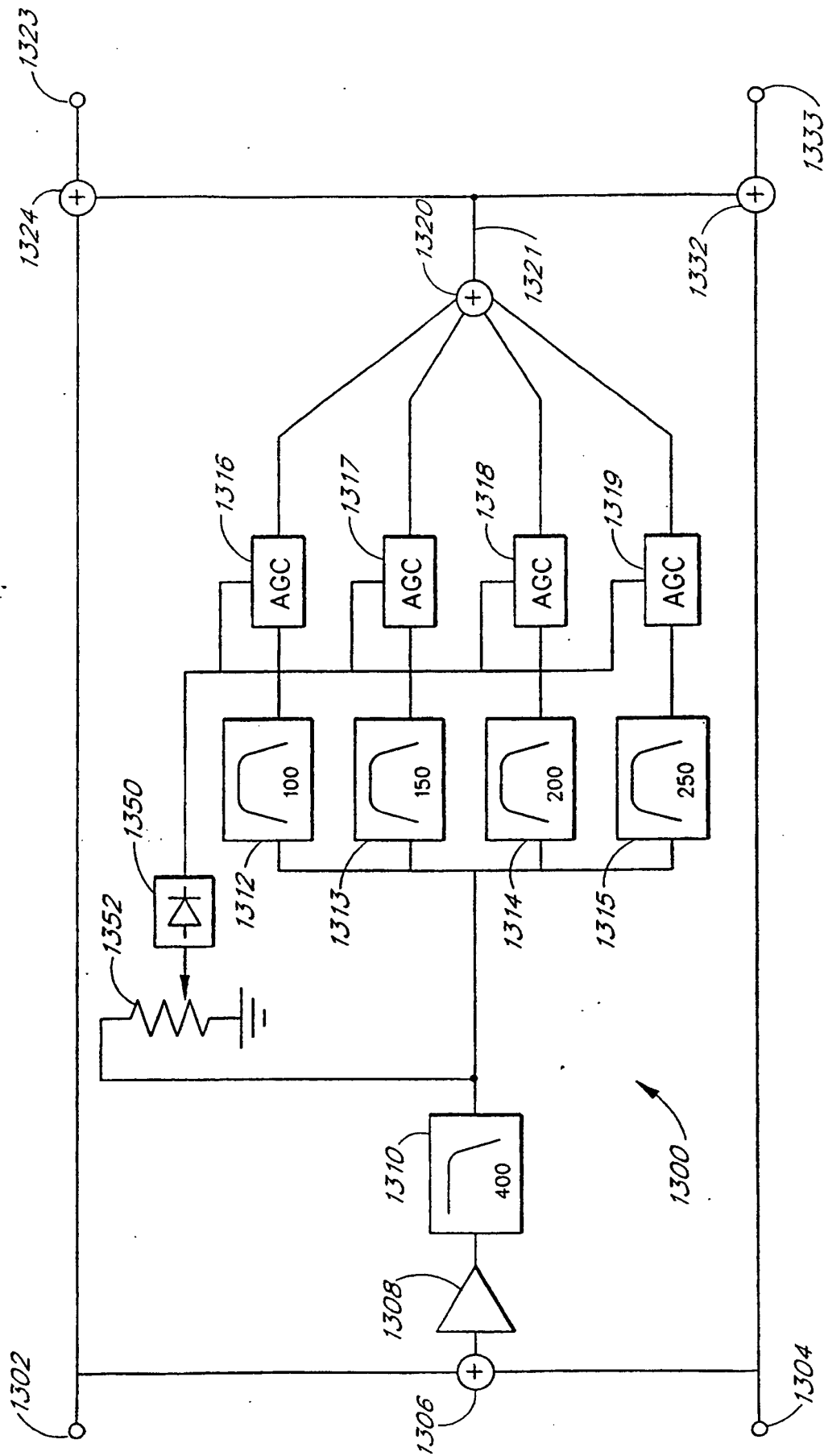


FIG. 13

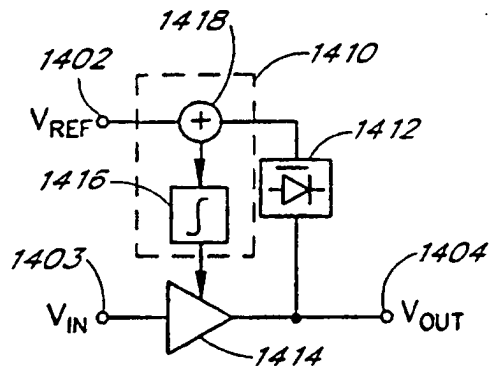


FIG. 14A

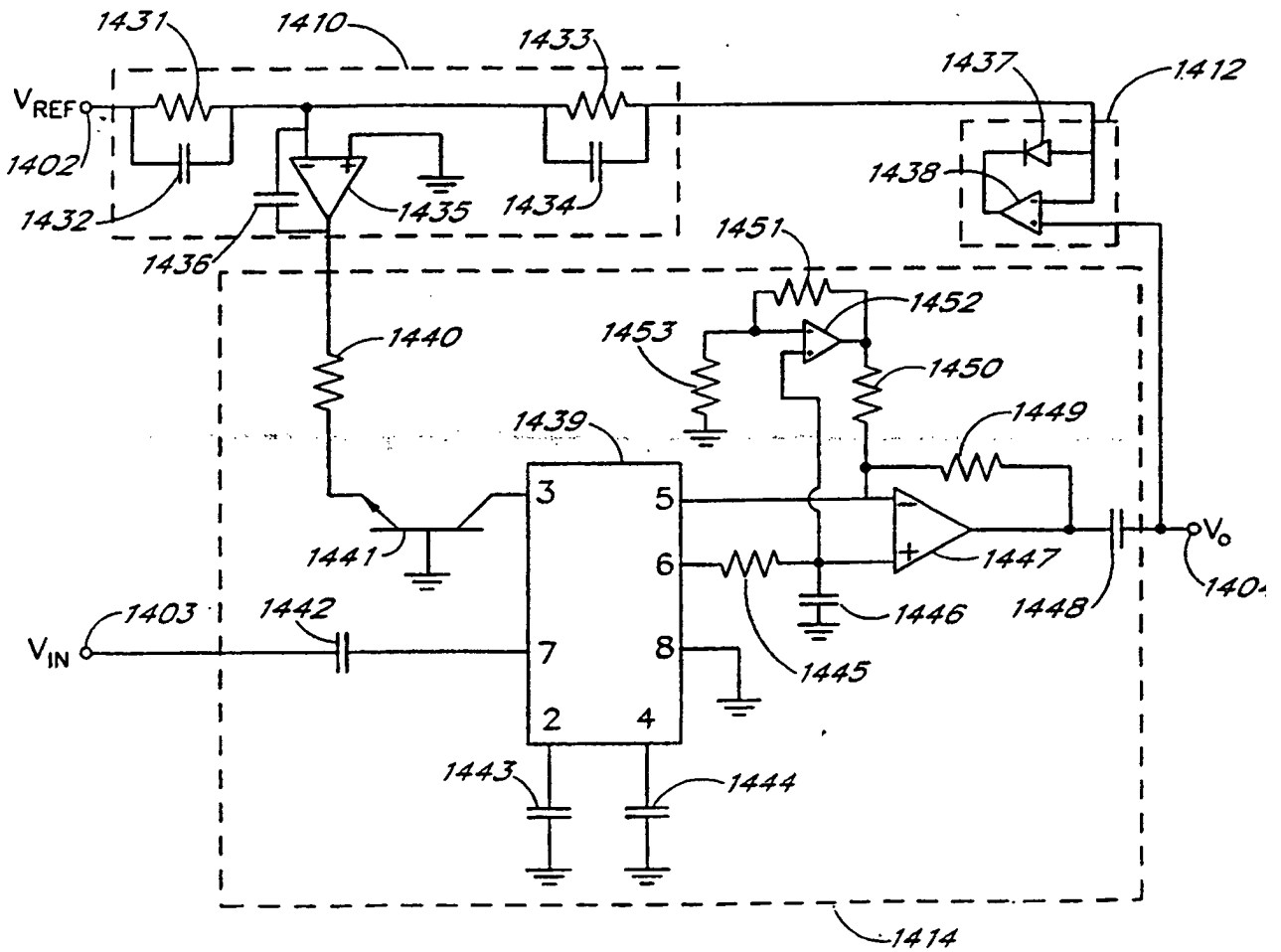


FIG. 14B



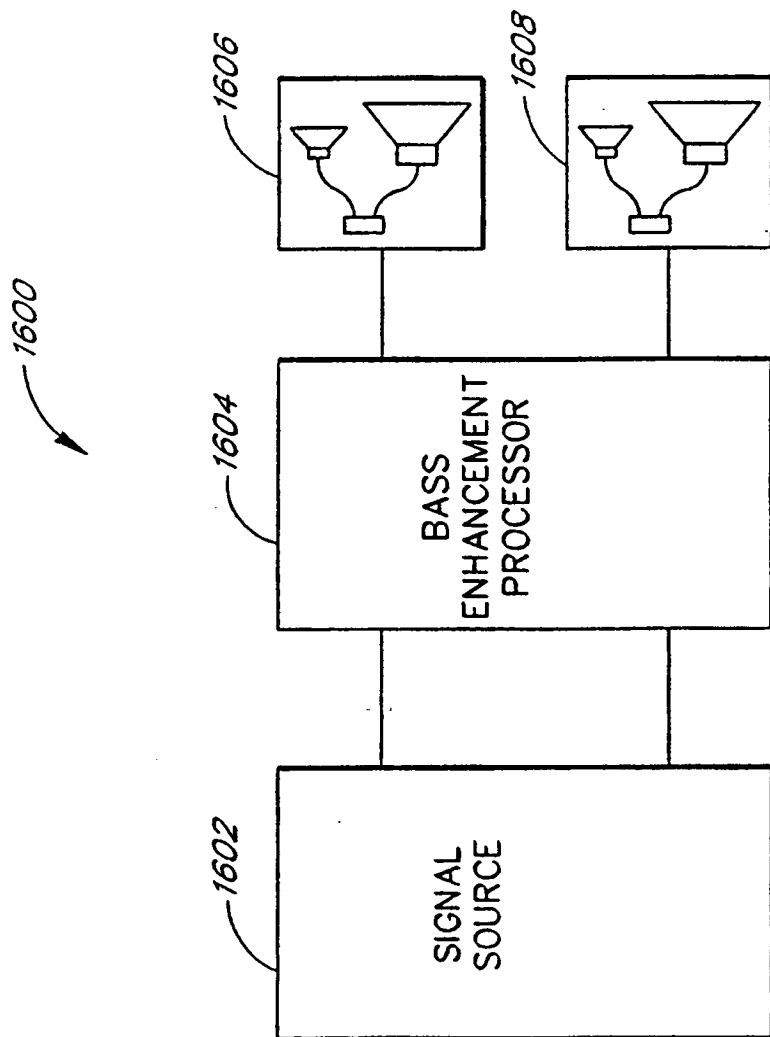


FIG. 16A

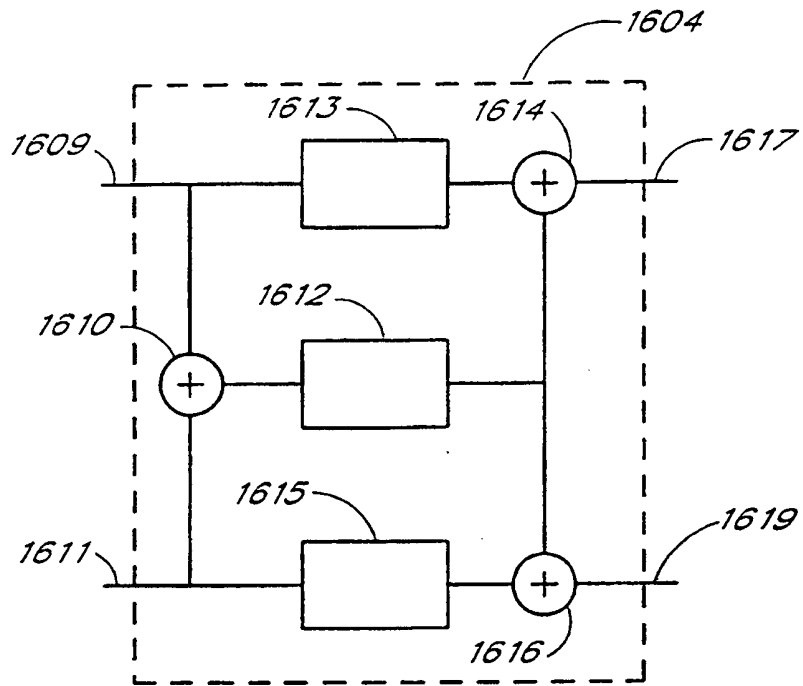


FIG. 16B

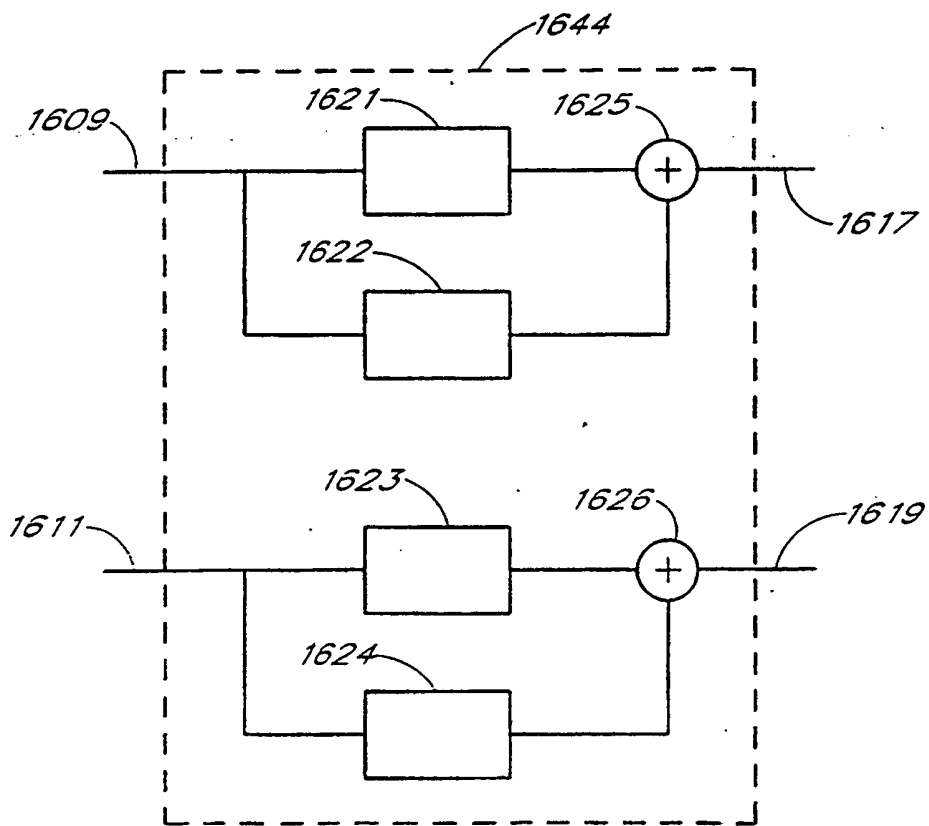


FIG. 16C

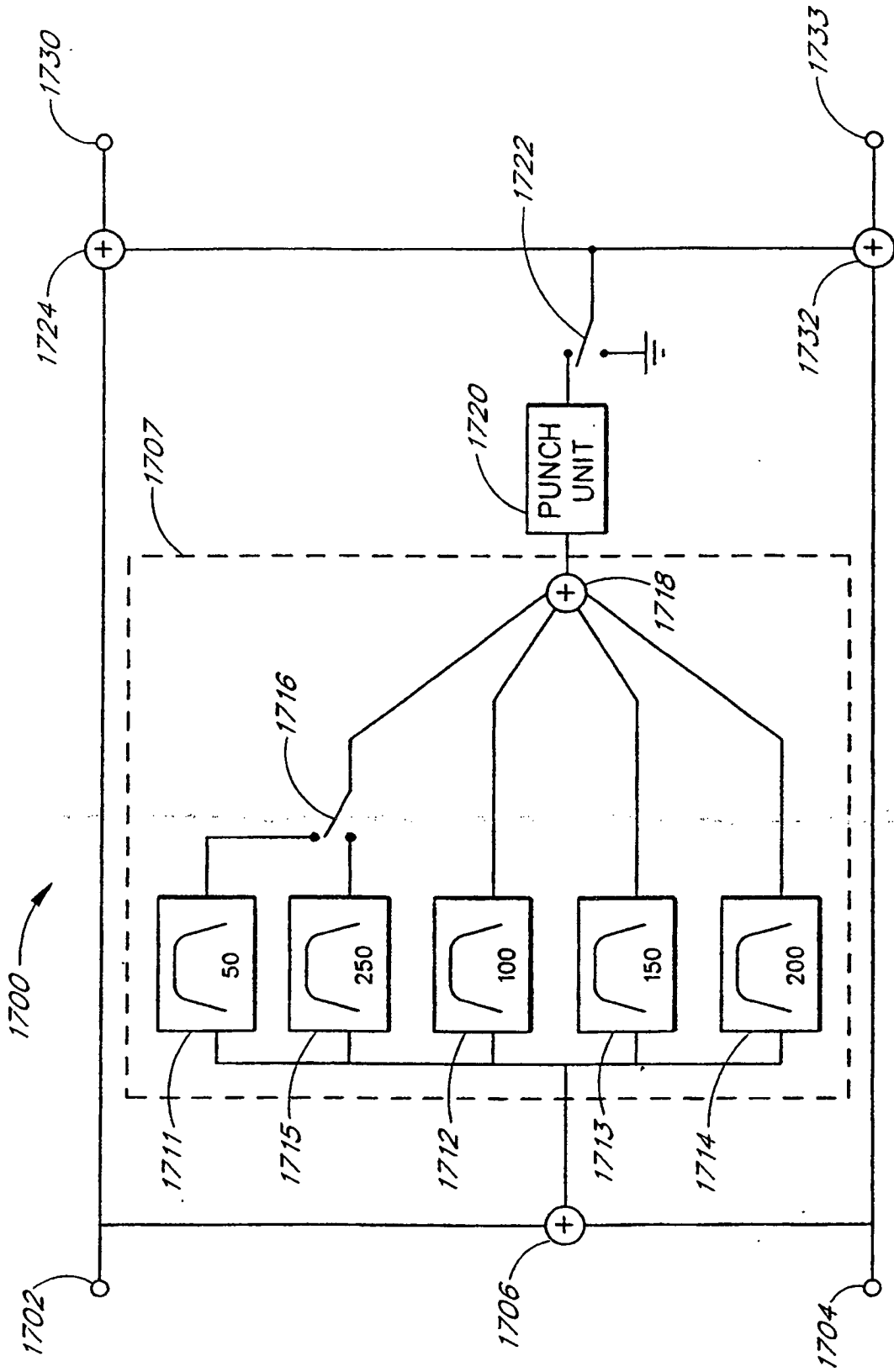


FIG. 17

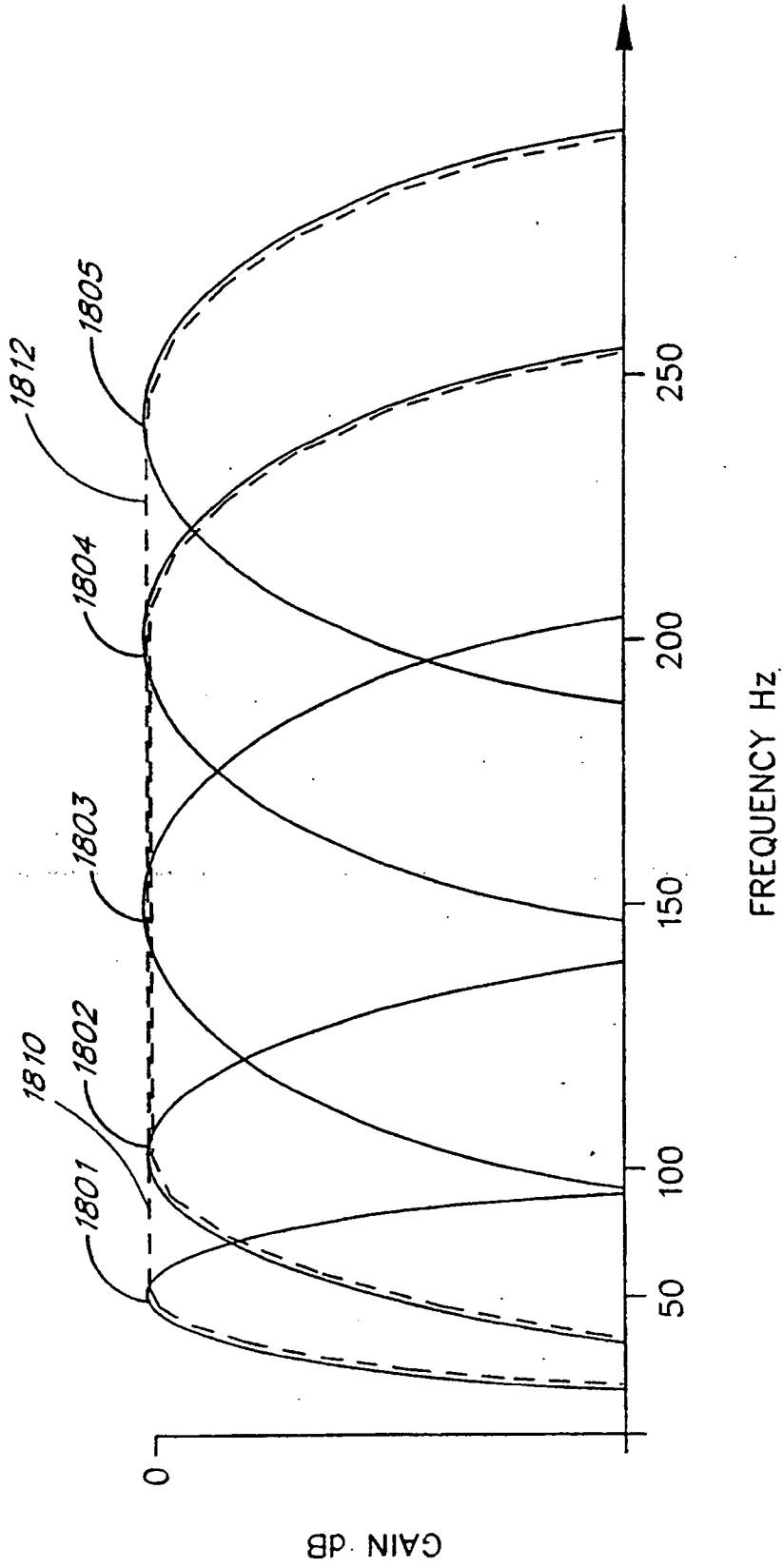
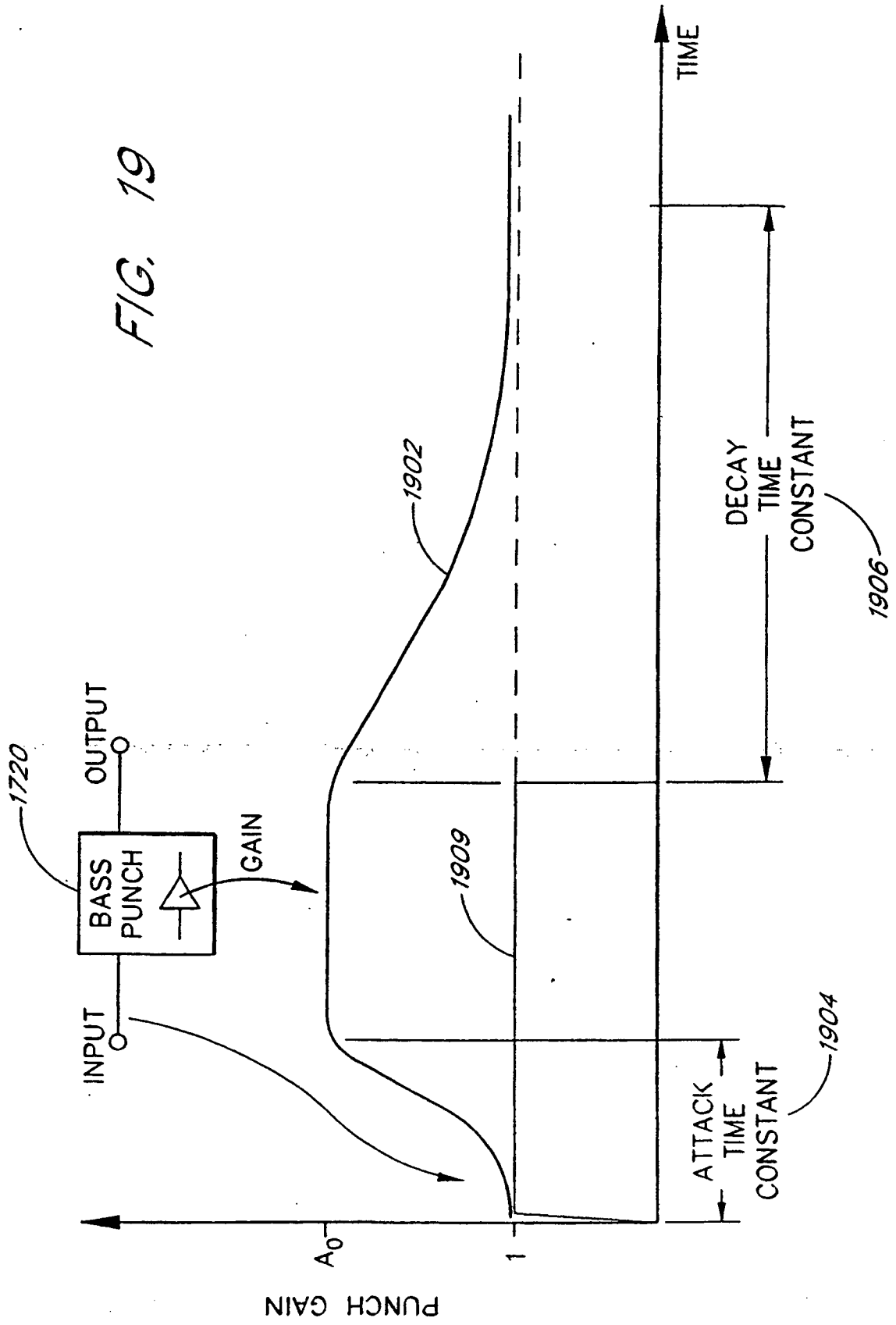


FIG. 18

FIG. 19



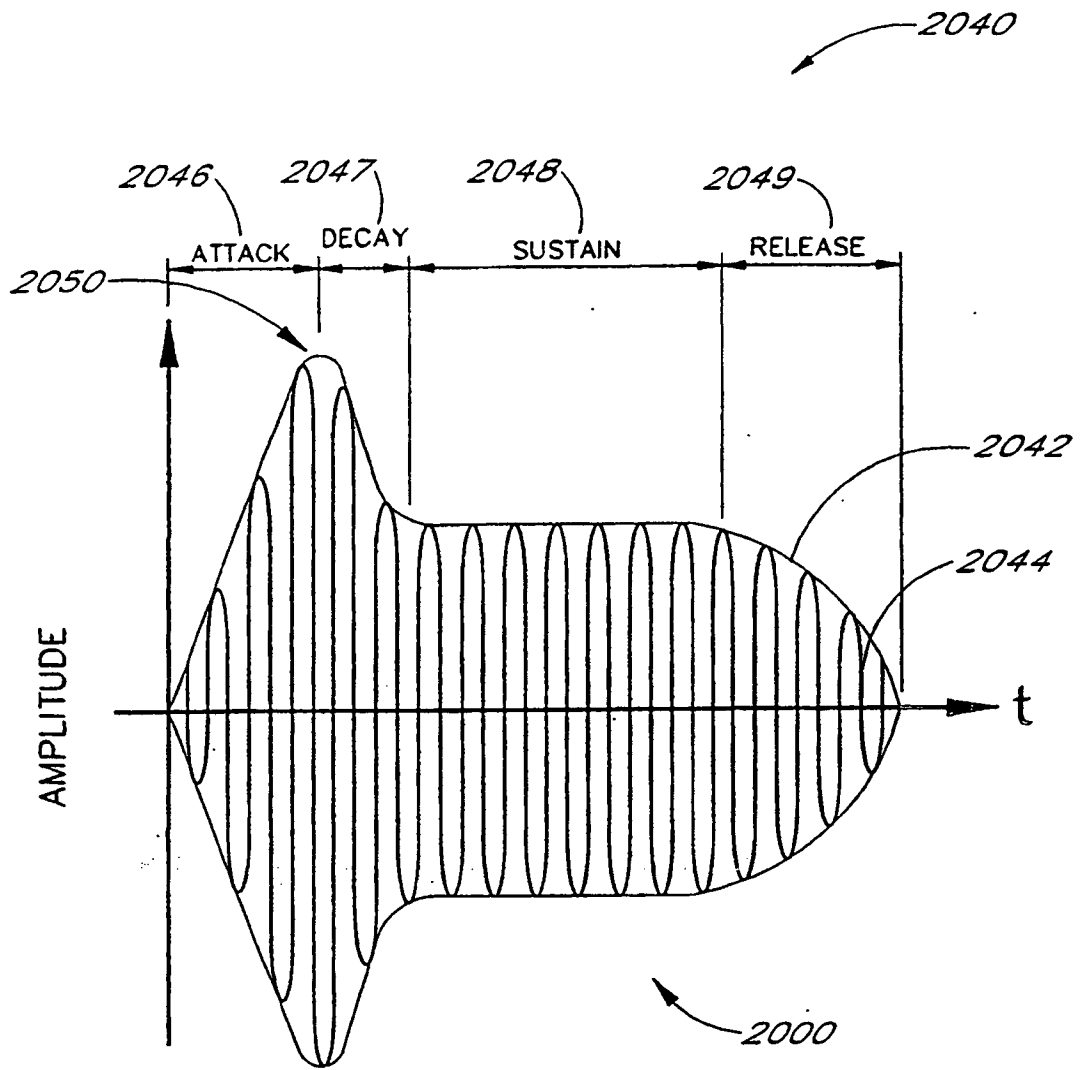
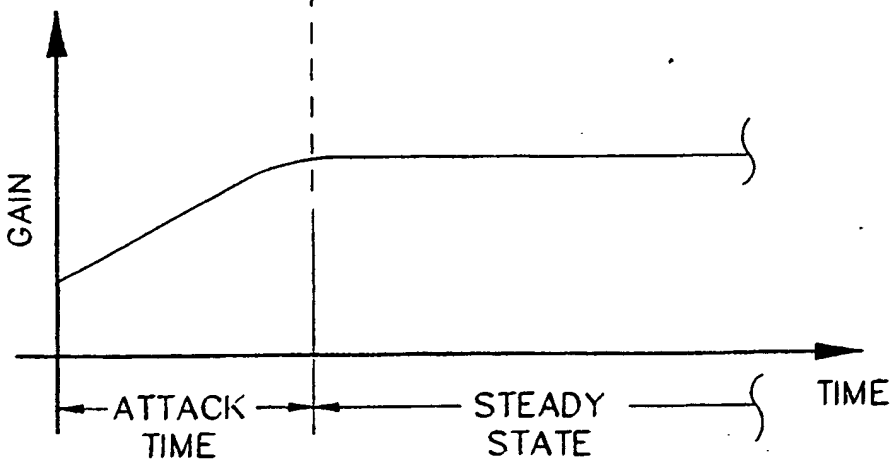
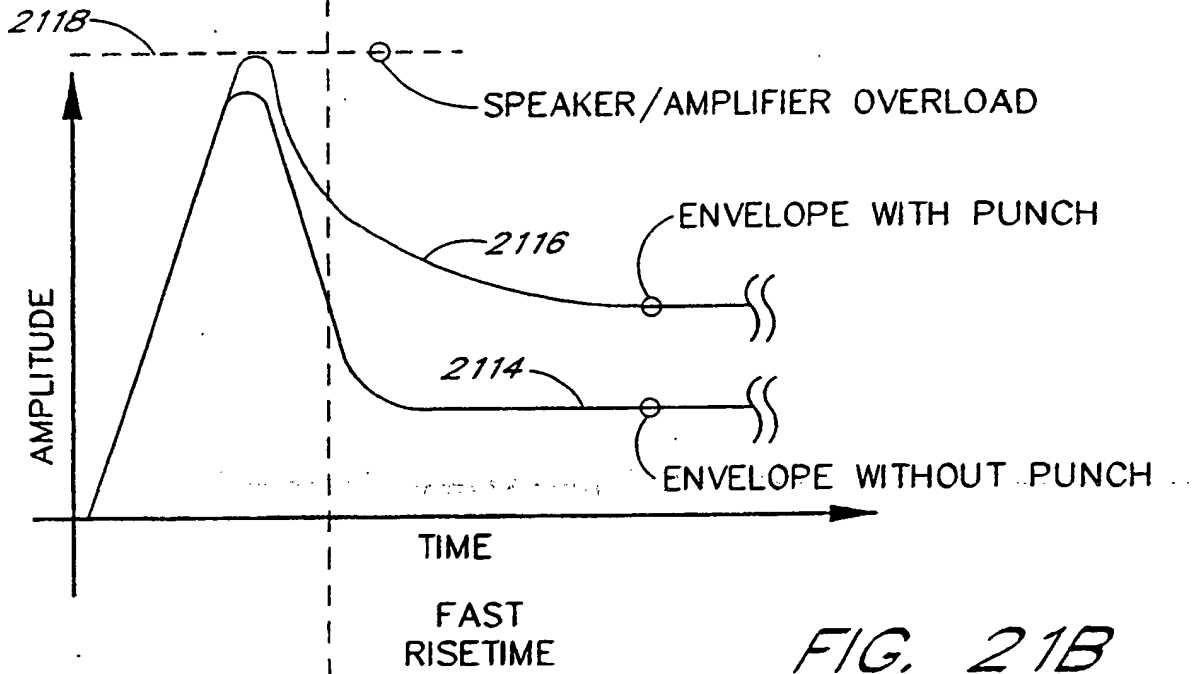
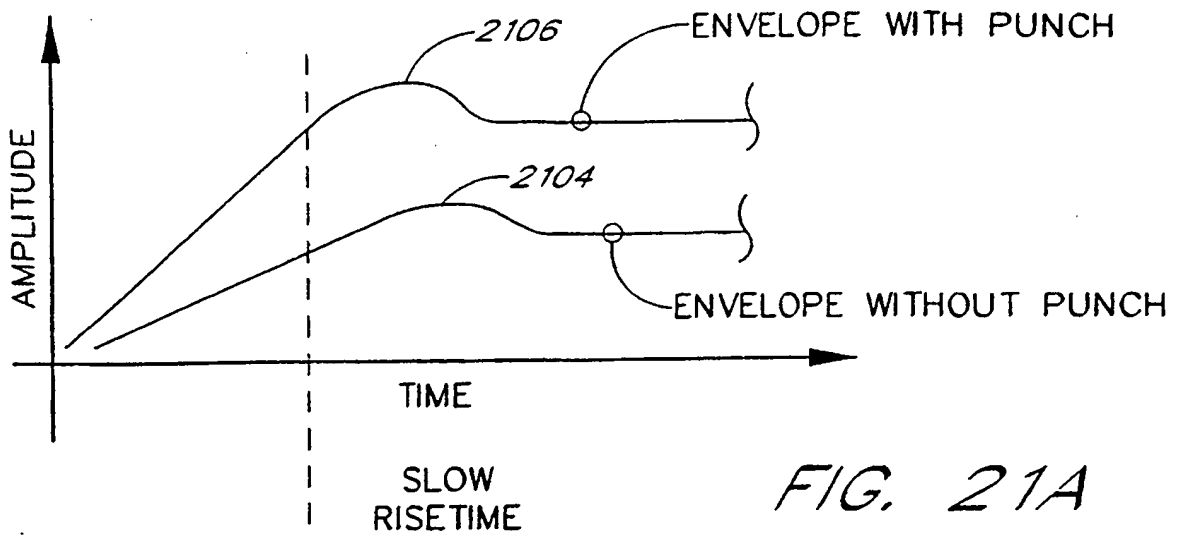
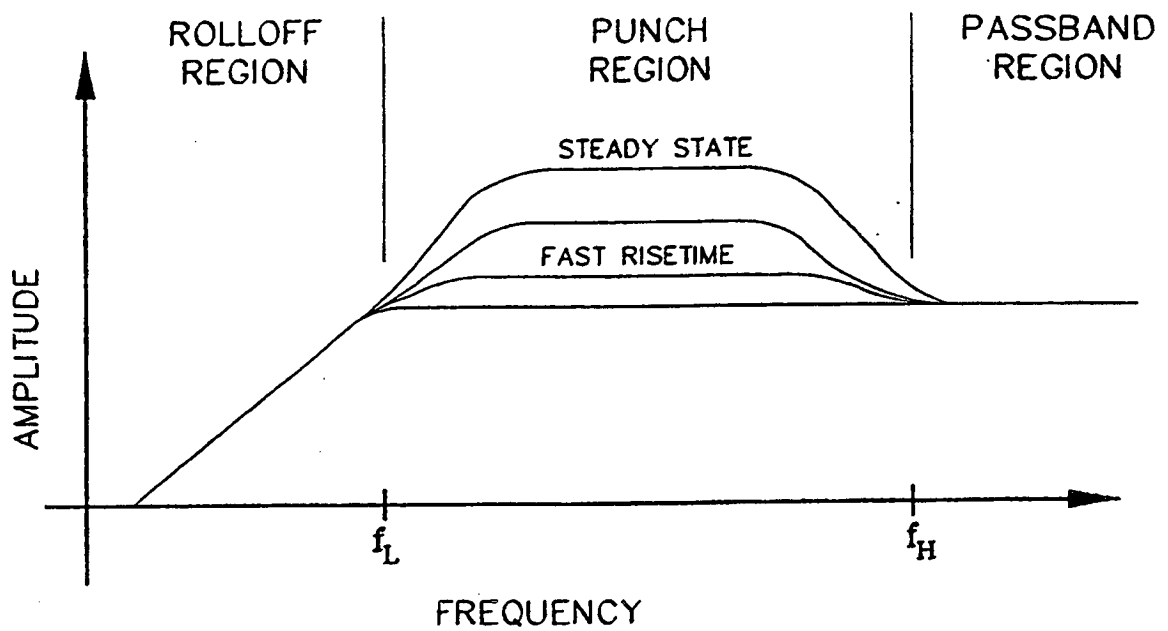


FIG. 20





*FIG. 21D*

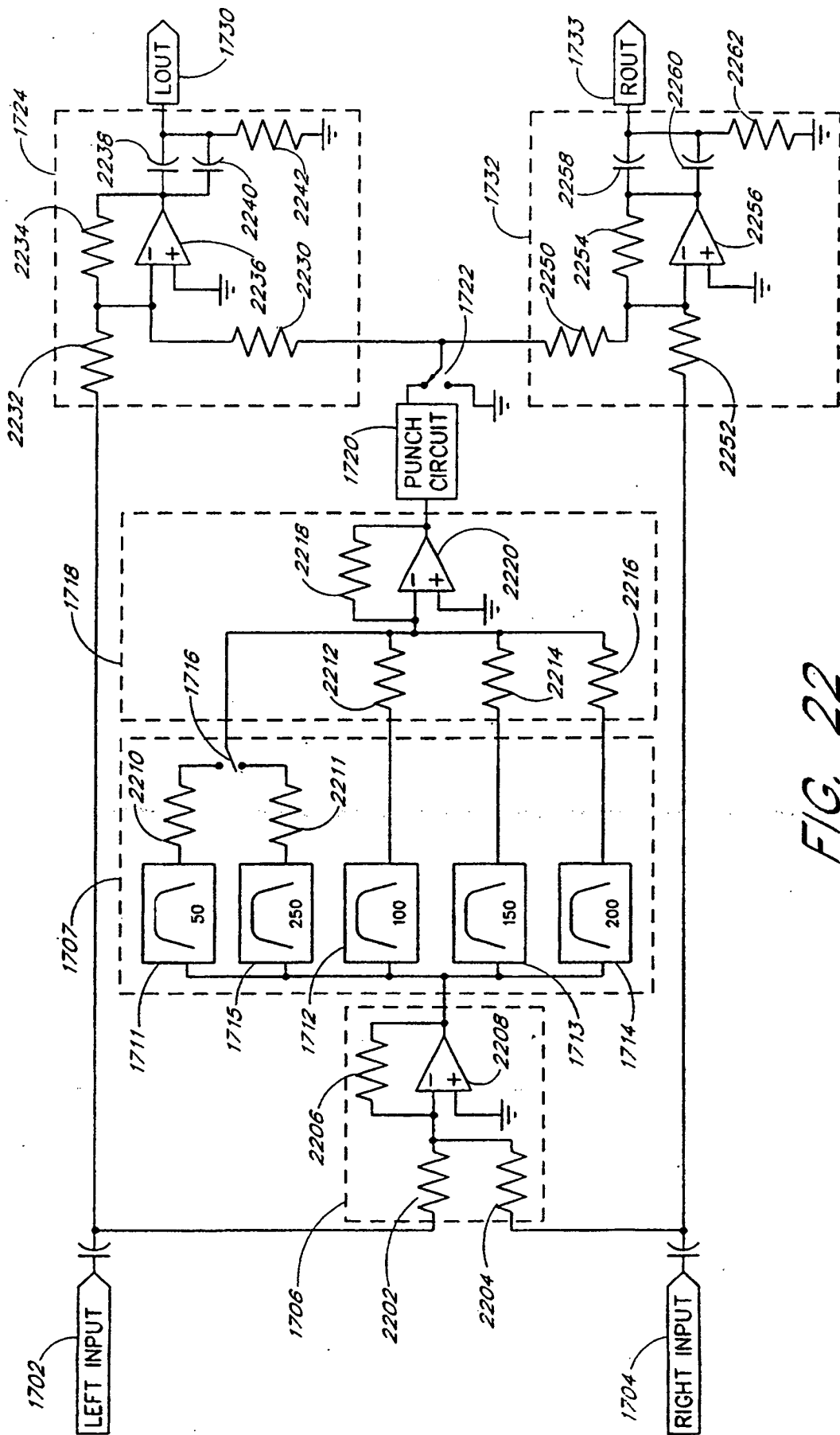


FIG. 22

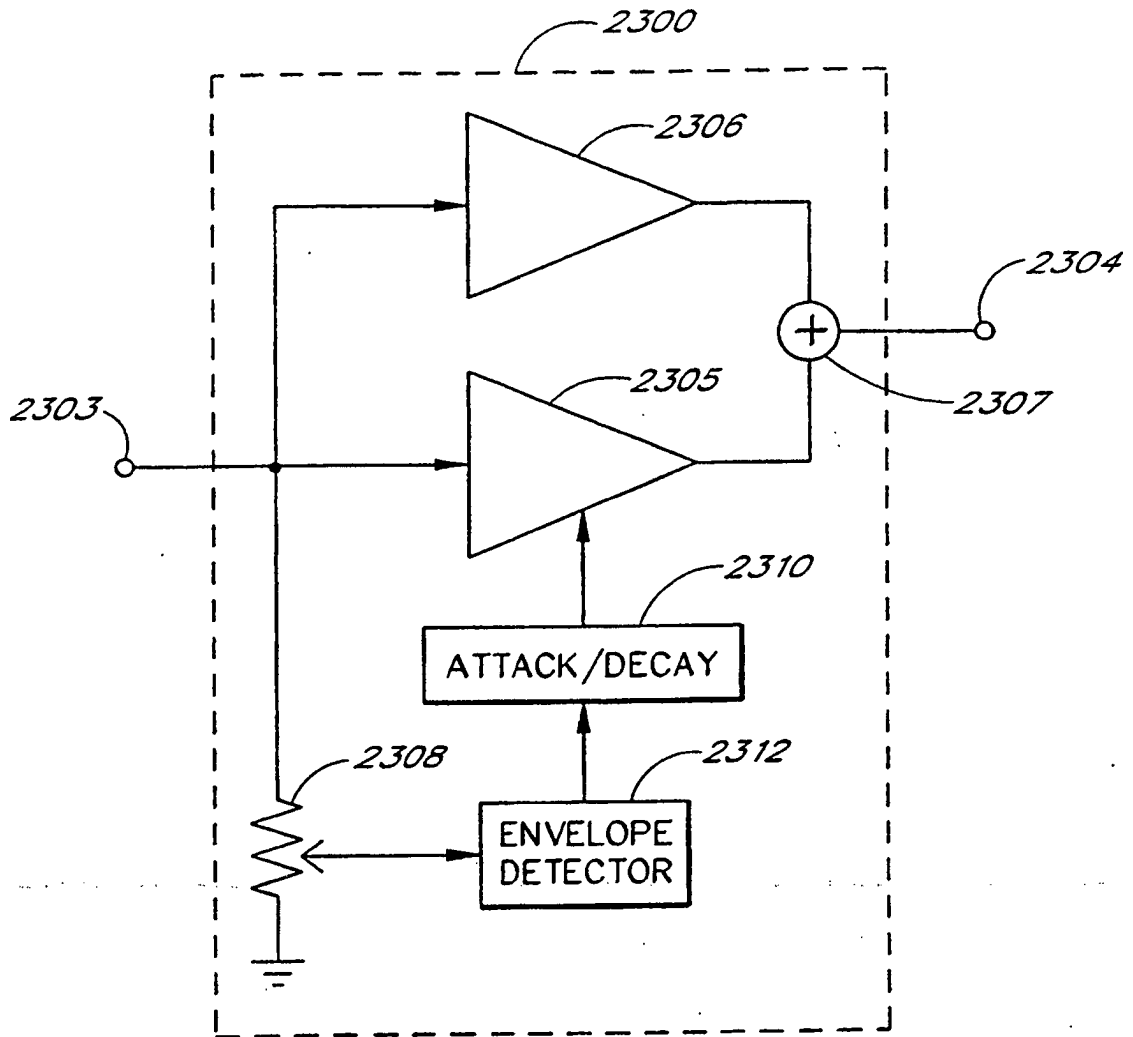


FIG. 23

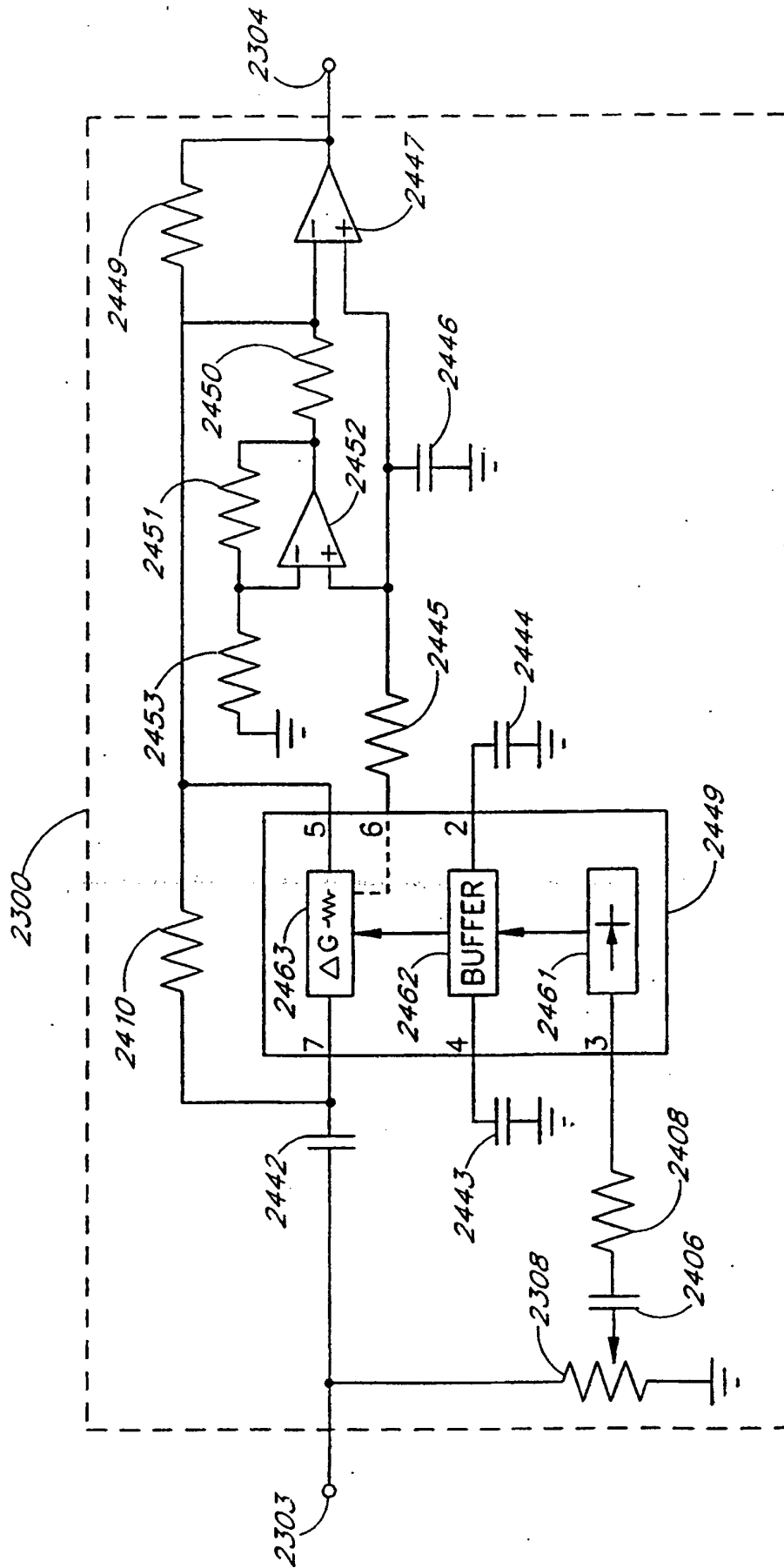


FIG. 24

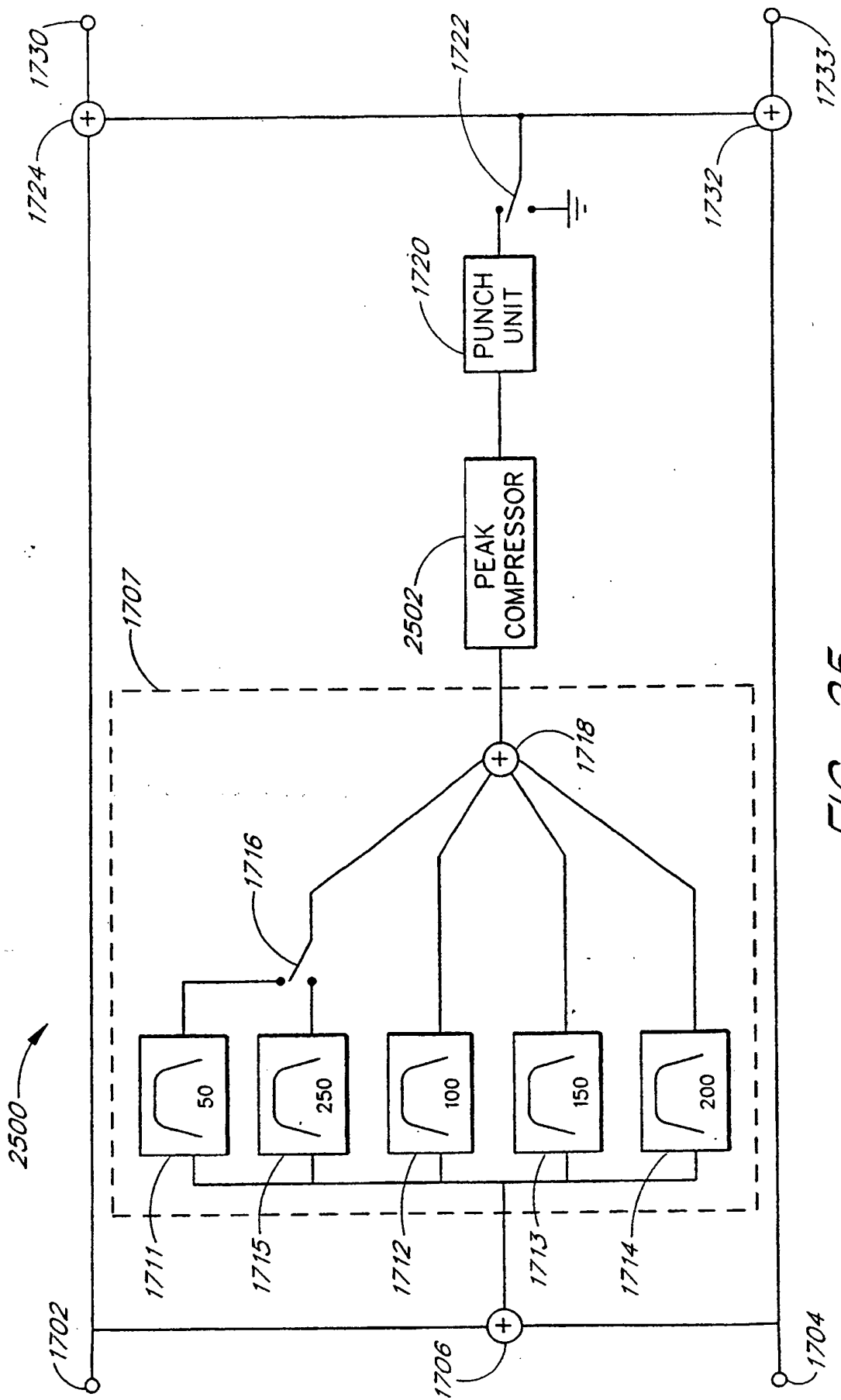


FIG. 25

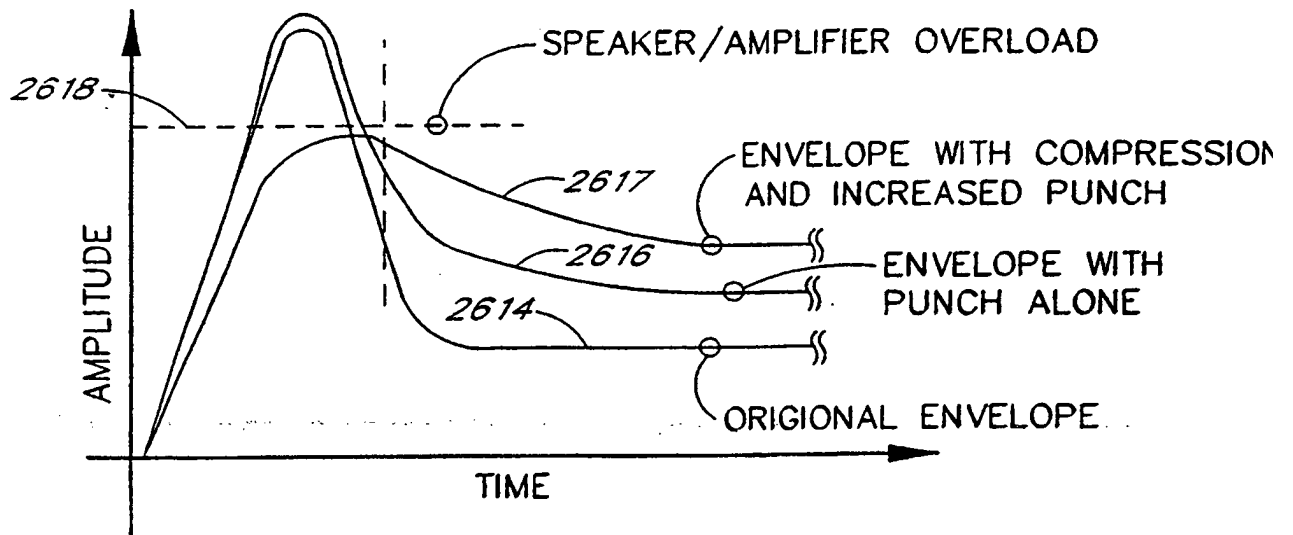


FIG. 26

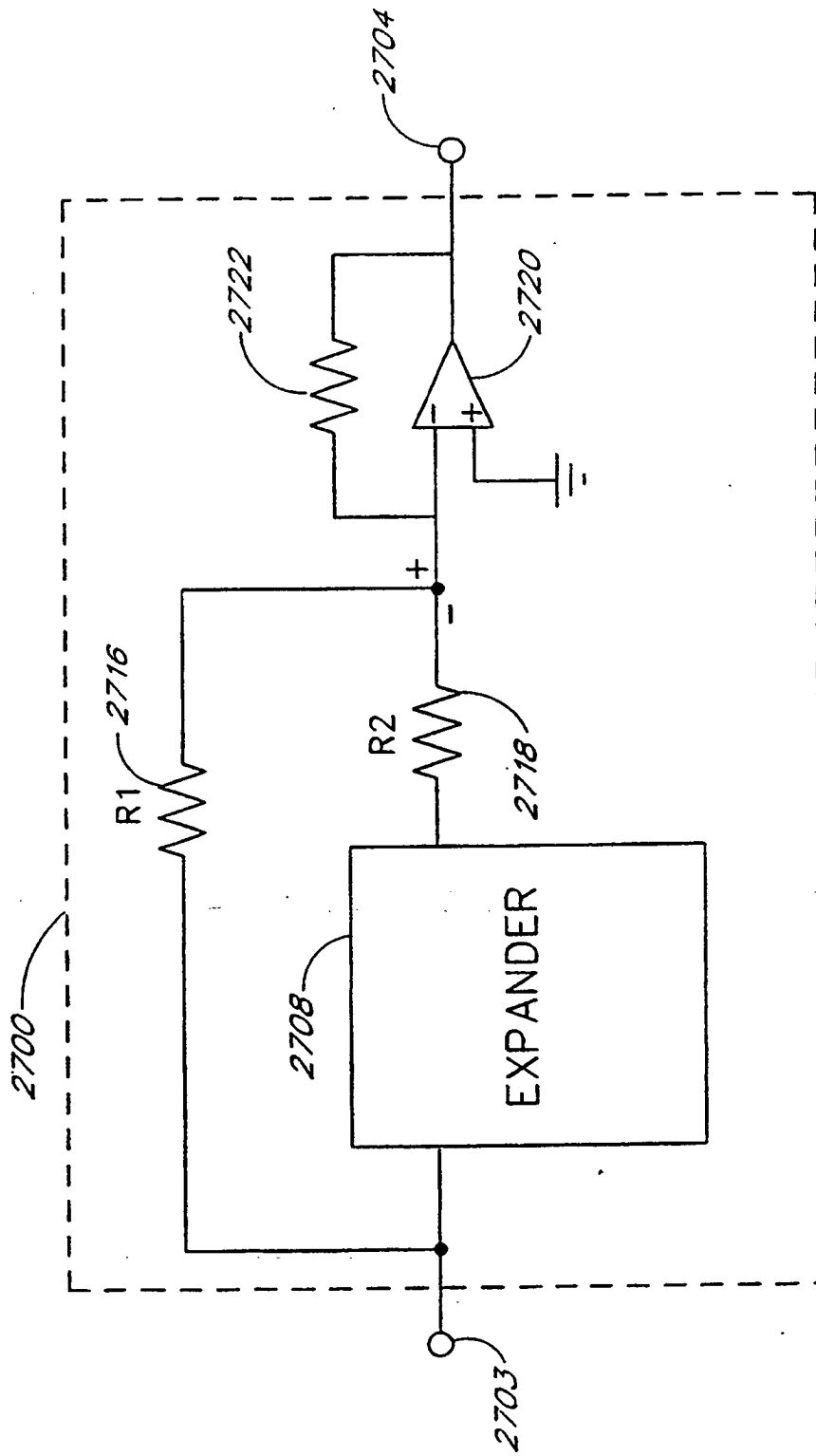


FIG. 27