



⑫ **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

⑳ Anmeldenummer: **92106049.7**

⑤① Int. Cl.⁵: **H04R 3/00, H04R 3/04**

㉒ Anmeldetag: **07.04.92**

③① Priorität: **09.04.91 DE 4111884**

⑦② Erfinder: **Klippel, Wolfgang, Dr.**
Altenberger Strasse 11
O-8021 Dresden(DE)

④③ Veröffentlichungstag der Anmeldung:
14.10.92 Patentblatt 92/42

⑧④ Benannte Vertragsstaaten:
DE FR GB IT NL

⑦④ Vertreter: **Kailuweit, Frank**
Harmsen & Utescher Rechtsanwälte
Patentanwälte Grunaer Strasse 2 Bürocenter
W 434
O-8010 Dresden(DE)

⑦① Anmelder: **Klippel, Wolfgang, Dr.**
Altenberger Strasse 11
O-8021 Dresden(DE)

⑤④ **Schaltungsanordnung zur Korrektur des linearen und nichtlinearen Übertragungsverhaltens elektroakustischer Wandler.**

⑤⑦ Die Erfindung betrifft eine Schaltungsanordnung zur Korrektur des linearen und nichtlinearen Übertragungsverhaltens elektroakustischer Wandler im gesamten Aussteuerungsbereich (Klein- und Großsignalverhalten), bestehend aus einem elektrischen Entzerrnetzwerk, das an den Anschlußklemmen des Wandlers angekoppelt ist und einem entweder zeitweise oder ständig angekoppelten Hilfsmittel zur Anpassung des Entzerrnetzwerkes an den Wandler. Das Entzerrnetzwerk (1) besteht aus einer Kettenschaltung von Übertragungsgliedern, wobei wenigstens ein Übertragungsglied (Zweitord Z) zwischen seinem Eingangs- und Ausgangstor ein nichtlineares Übertragungsverhalten aufweist. Das nichtlineare Entzerrnetzwerk enthält lineare Übertragungssysteme, multiplikative und additive Verknüpfungselemente und nichtlineare, gedächtnislose Zweitore, die entsprechend der gespiegelten Wirkstruktur des Wandlers verschalten sind. Die Parameter der nichtlinearen, gedächtnislosen Zweitore sind über Steuersignale (39, 40, 41) veränderbar. Das nur zur Anpassung aktivierte Anpassungshilfsmittel enthält ein Hauptsteuerwerk (89), ein Generierungsteil (75) zur Erzeugung eines Anregungssignals und ein Analyseteil (76) zur Umwandlung des über einen Sensor (3) aufgenommenen Meßsignals in Steuersignale (39, 40, 41) zur automatischen Parametereinstellung des Entzerrnetzwerkes. Das mit diesem Hilfsmittel an den Wandler (2) angepaßte Entzerrnetzwerk verändert die linearen Übertragungseigenschaften und reduziert die nichtlinearen Verzerrungen des Gesamtsystems.

Die Erfindung wird durch Fig. 22 am deutlichsten gekennzeichnet.

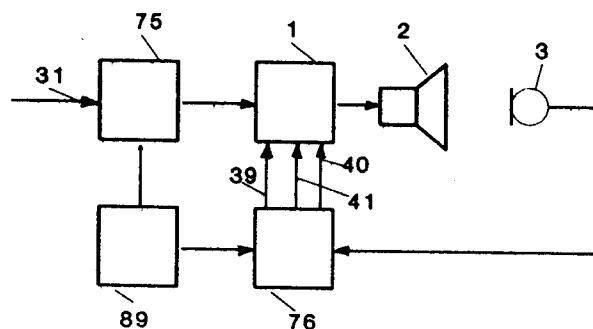


Fig. 22

Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Korrektur des linearen und nichtlinearen Übertragungsverhaltens elektroakustischer Wandler, bestehend aus einem elektroakustischen Wandler, einem an den elektrischen Eingangsklemmen angekoppelten elektrischen Entzerrernetzwerk und einem Hilfsmittel zur Anpassung des Entzerrernetzwerkes an den Wandler. Das elektrische Netzwerk weist ein nichtlineares Übertragungsverhalten auf und verändert das elektrische Signal in der Weise, daß sich die nichtlinearen Wirkungen des Netzwerkes und des angekoppelten Wandlers kompensieren. So kann ein Gesamtsystem mit verminderten nichtlinearen Verzerrungen und verbessertem linearen Übertragungsverhalten realisiert werden. Mit Hilfe eines Anpaßverfahrens und einer Anordnung können die Parameter des elektrischen Netzwerkes verändert und selbständig an das konkrete Übertragungsverhalten des Wandlers angepaßt werden.

Die Ursachen für die nichtlinearen Verzerrungen bei elektroakustischen Wandlern sind sehr verschieden und hängen von dem jeweils verwendeten Wandlerprinzip ab.

Bei elektrodynamischen Wandlern (Lautsprecher, Kopfhörer, Mikrofone, technische Aktuatoren) verursachen die auslenkungsabhängigen Parameterveränderungen die stärksten nichtlinearen Verzerrungen. Bei Lautsprecheranordnungen mit spezieller Schallführung entstehen in der Druckkammer und im Horneingang durch nichtlineare Kompressions- und Strömungsvorgänge zusätzliche Verzerrungen. Selbst bei elektrostatischen Wandlern (Kondensatormikrofon) wird durch die Umverteilung (bzw. Abwanderung) der elektrischen Ladungen das lineare Übertragungsverhalten gestört.

Die Verminderung der nichtlinearen Signalverzerrungen führt zu einer Verbesserung des subjektiven Höreindrucks bei elektroakustischer Aufnahme und Wiedergabe von Audiosignalen. Aber auch in der Meßtechnik und bei der aktiven Lärmbekämpfung werden zum Teil erhebliche Forderungen an die Linearität von Sensoren und Aktuatoren gestellt. Nichtlineare Verzerrungen, die im Antischallsystem auftreten, werden durch den Störschall nicht kompensiert und begrenzen die Wirksamkeit der Schallschutzmaßnahme. Eine Linearisierung von Schallsendern mit konstruktiven Mitteln führt in der Regel zu einer Senkung des Wirkungsgrades und führt bei praktischen Beschallungsaufgaben zu einem erhöhten Mehraufwand. Deshalb versucht man durch zusätzliche elektrische Systeme den Wandler zu entzerren und sein lineares und nichtlineares Übertragungsverhalten zu verbessern.

Dazu wurde in dem GB Patent 1.031,145 (PH 18.481) für elektroakustische Schallsender eine negative Gegenkopplung vorgeschlagen. Hierzu wird am Wandler oder im umgebenden Schallfeld eine elektrische, mechanische oder akustische Größe gemessen und in eine dem Antriebssignal äquivalente Größe (Strom oder Spannung) gewandelt und dem Speisesignal in entgegengesetzter Phasenlage zugesetzt, d.h. gegengekoppelt.

Die negative Gegenkopplung hat den Vorteil, daß die genaue Struktur des nichtlinearen Übertragungssystems nicht bekannt sein muß und daß bei einer Veränderung der Nichtlinearität (Alterung) die Funktionstüchtigkeit erhalten bleibt. Jedoch sind die erforderlichen Signalaufnehmer teuer, anfällig und besitzen ein bestimmtes Übertragungsverhalten, das durch geeignete Entzerrernetzwerke kompensiert werden muß. Die Gefahr einer möglichen Mitkopplung bedingt Maßnahmen zur Korrektur des Phasenganges ([1] Hall, D.S.: Design Considerations for an Accelerometer-Based Dynamic Loudspeaker Motional Feedback System. 87. Audio Eng. Soc. Conv, New York Oktober 1989 (Preprint 2863)). All diese Probleme verhindern, daß sich die Gegenkopplung an elektroakustischen Schallsendern im breiten Umfang durchsetzte.

Im Hinblick auf die praktische Realisierung ist es vorteilhaft, auf den Signalaufnehmer am Wandler grundsätzlich zu verzichten, und eine rein serielle Vorverzerrung ohne Signalarückführung zu realisieren.

Hierzu ist es zunächst erforderlich, das nichtlineare Übertragungsverhalten des Wandlers ausreichend genau zu modellieren und durch eine nichtlineare Übertragungsfunktion zu beschreiben. Wird dem Wandler nun ein dynamisches nichtlineares System vorgeschaltet, das die inverse nichtlineare Übertragungsfunktion des Wandlers genügend genau nachbildet, so lassen sich die Gesamtverzerrungen kompensieren.

Einen möglichen Ansatzpunkt für die Modellierung des nichtlinearen Wandlers bietet die VOLTERRA-Reihenentwicklung. Sie ist ein sehr vorteilhaftes Handwerkzeug um Verzerrungen zweiter und dritter Ordnung von schwach nichtlinearen Systemen bei sehr kleinen Eingangssignalen zu beschreiben. Bei stärkeren Nichtlinearitäten kann das System nicht mehr durch quadratische und kubische Teilsysteme beschrieben werden und weitere Glieder der VOLTERRA-Reihe müssen berücksichtigt werden. Um eine Konvergenz zu erzielen, muß nach dem Kriterium von Weierstrass das Eingangssignal stets ausreichend klein und begrenzt sein. Diese Theorie wurde erstmals von ([2] Kaizer, A.J.: Modeling of the Nonlinear Response of an Electrodynamical Loudspeaker by a Volterra Series Expansion. J. Audio Eng. Soc. 35 (1987) 6, S. 421) auf den Wandler angewendet. Im Kleinsignalverhalten wurde eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Verzerrungen erzielt, jedoch bei größeren Aussteuerungen können nichtlineare Effekte beobachtet werden, die nicht mit quadratischen und kubischen Übertragungsfunktionen beschrieben werden können ([3] Klippel, W.: The Large-Signal-Behaviour of Electro-dynamical Loudspea-

kers at Low Frequencies. 90. AES Convention Paris 1991, Preprint 3049).

Sind die VOLTERRA-Funktionale eines beliebigen kausalen, zeitinvarianten, nichtlinearen Systems bekannt, so kann nach ([4] Butterweck, H.J.: Frequenzabhängige nichtlineare Übertragungssysteme. Archiv Elektronik und Übertragungstechnik, Band 21 (1967), Heft 5, S. 239) ein entsprechendes Kompensationssystem mit der inversen Übertragungsfunktion abgeleitet werden. Kaizer wandte diese Methode auf den elektrodynamischen Wandler an und schlug in dem EP 85200885 eine "Anordnung zur Umwandlung eines elektrischen Signales in ein akustisches Signal und umgekehrt bei Verwendung eines nichtlinearen Netzwerkes" vor, die eine Verminderung der linearen und nichtlinearen Verzerrungen bewirken soll. Diese Anordnung "enthält mindestens zwei parallele Zweige, wobei der erste Zweig die Verzerrungen erster Ordnung ... und der andere Zweig die Verzerrungen höherer Ordnung kompensiert". Diese Anordnung hat eine konsequent additive Struktur entsprechend den Reiheneigenschaften der VOLTERRA-Entwicklung. Die einzelnen Zweige stellen lineare, quadratische, kubische oder nichtlineare Netzwerke höherer Ordnung dar und kompensieren die entsprechenden Verzerrungsprodukte. Leider berücksichtigt dieses Konzept nur unzureichend die wandlerspezifischen Besonderheiten und verlangt in der praktischen Realisierung eine Beschränkung auf quadratische und kubische Korrektursysteme. So ist zwar im Kleinsignalbereich eine erfolgreiche Verzerrungskompensation möglich, jedoch bei größerem Eingangssignal verhält sich der Wandler nicht mehr wie ein ideal quadratisches bzw. kubisches System und die zwangsläufige Fehlkomensation führt statt zu einer Verminderung zu einer Erhöhung der Verzerrungen im Übertragungssignal. Die Einfügung von Kompensationsgliedern höherer Ordnung erweitert zwar den nutzbaren Aussteuerungsbereich, löst das Problem aber grundsätzlich nicht und führt zu technisch kaum realisierbaren Entzerrungssystemen. Die additive Parallelstruktur des Entzerrernetzwerkes, die sich zwangsläufig aus der VOLTERRA-Modellierung ergibt, führt zu einer universellen jedoch aufwendigen Schaltungsstruktur, die entscheidende Nachteile im Großsignalverhalten aufweist.

Das Problem der Anpassung nichtlinearer Entzerrernetzwerke an den elektroakustischen Wandler wurde in der Literatur bisher nicht diskutiert und keine Methoden, Hilfsmittel bzw. automatische Verfahren bisher dazu entwickelt.

Aufgabe der Erfindung ist es, erstmalig ein Entzerrernetzwerk ohne ständige Signalführung (motional feed back) zu schaffen, das eine vollständige, automatische (selbständige) Kompensation der nichtlinearen Verzerrungen im Klein- und Großsignalbereich (bis zur maximale Verlustleistung bzw. im gesamten Auslenkungsbereich der Schwingspule) erlaubt, die spezifischen Besonderheiten (nichtlineare Verzerrungsursachen) des jeweiligen elektroakustischen Wandlers besser berücksichtigt und mit weniger Aufwand realisiert werden kann.

Erfindungsgemäß wird der elektroakustische Schallwandler durch ein elektro-mechano-akustisches Ersatzschaltbild beschrieben. Hierbei werden die für die Signalübertragung wesentlichen konstruktiven Bestandteile des Wandlers in konzentrierten Wirkelementen funktional zusammengefaßt, die durch jeweils einen Parameter (z.B. Dämpfung, Steifigkeit der Aufhängung, elektrodynamischer Kopplungsfaktor B_1 , etc.) gekennzeichnet werden. Außer der bewegten Masse m der Schwingspule und der Membran unterliegen alle weiteren Elemente des Wandler-Systems zeitlichen Parameterveränderungen. Die durch Alterung, Ermüdung und Erwärmung bedingten Veränderungen erweisen sich als Langzeitprozesse, die die linearen Übertragungseigenschaften des Wandlers verändern, aber keine nichtlinearen Signalverzerrungen hervorrufen. Die durch die Zustandsgrößen Auslenkung, Strom, Schnelle, Spannung und Schalldruck bedingten Parameterveränderungen führen zu den bekannten nichtlinearen Verzerrungen im übertragenen Signal. Das Übertragungsverhalten wird mit einer nichtlinearen Integro-Differentialgleichung (IDG) vollständig beschrieben, hieraus wird durch Umformung die zugehörige Entzerrerübertragungsfunktion abgeleitet und direkt in die Schaltungsstruktur des Entzerrernetzwerkes überführt.

Daraus ergibt sich die Schaltungsstruktur, die die physikalischen Besonderheiten des jeweiligen elektroakustischen Wandler-Systems berücksichtigt und eine vollständige Kompensation der nichtlinearen Verzerrungen erlaubt.

Zum besseren Verständnis können die zur Lösung der Aufgabe notwendigen Schritte auch mit Hilfe von Signalfußplänen erklärt werden.

Das soll am Beispiel des elektrodynamischen Tieftonlautsprechers in Spannungsspeisung illustriert werden.

Das elektromechanische Ersatzschaltbild (Fig. 7a) läßt sich mit Hilfe der zugehörigen nichtlinearen IDG in ein äquivalentes Signalfußbild (Fig. 7b) übertragen, das aus einem nichtlinearen Übertragungssystem (152) und einem nachfolgenden linearen Übertragungssystem (153) besteht. Das lineare Teilsystem (153) setzt sich aus einem elektro-mechanischen System (144) mit der Übertragungsfunktion $X(s)$ und einem nachgeschalteten mechano-akustischen System mit der Übertragungsfunktion $H(s)$ zusammen.

Das dem linearen Übertragungssystem (153) vorgeschaltete nichtlineare System (152) verursacht die

störenden, nichtlinearen Signalverzerrungen.

Das nichtlineare System (152) enthält nichtlineare, dynamische Übertragungssysteme (Zweitore 147 - 151) und ein lineares Übertragungssystem (Zweitore 167), das ebenfalls die Übertragungsfunktion $X(s)$ aufweist und weitere Verknüpfungselemente (139 - 143, 145).

Die linearen und nichtlinearen Übertragungssysteme besitzen einen Eingang und einen Signalausgang, die Verknüpfungselemente besitzen zwei Signaleingänge und einen Signalausgang. Der Ausgang jedes Übertragungssystems ist mit dem einen Eingang eines Verknüpfungselementes verbunden. Beide Teile werden im folgenden als Dreitor bezeichnet. Jedes Dreitor repräsentiert genau eine nichtlineare Verzerrungsursache.

Die Dreitore, die die auslenkungsabhängige Induktion, die auslenkungsabhängigen Dämpfung, den elektromagnetischen Antrieb und die auslenkungsabhängigen Steifigkeit repräsentieren enthalten als Verknüpfungselemente Addierer (139, 141, 142, 143). Überraschenderweise führt der auslenkungsabhängige, elektrodynamische Antrieb zu einem multiplikativen Verknüpfungselement (140). Das Dreitor, das die Dopplerverzerrungen beschreibt, enthält als Verknüpfungselement ein veränderliches Verzögerungsglied (145).

Alle Dreitore sind in einer bestimmten Struktur miteinander verbunden. Hierbei ist der Ausgang des vorhergehenden Verknüpfungselementes mit einem Eingang des nächsten Verknüpfungselementes verknüpft und führt zu einer Verkettung aller enthaltenen Dreitore. Hierbei steht das Dreitor (147, 139), das die elektrische Induktion beschreibt, an erster Stelle, gefolgt von dem Dreitor des elektrodynamischen Kraftfaktors (148, 140) und den Dreitoren, die mit dem elektromagnetischen Antrieb (150, 142), der nichtlinearen Dämpfung (141, 149) und der Steifigkeit (143, 151) korrespondieren. An letzter Stelle unmittelbar vor dem linearen Teilsystemen (145, 146) steht das Dreitor (145, 167), das mit der Erzeugung der Dopplerverzerrungen im akustischen System korrespondiert. Die Eingänge aller nichtlinearen Teilsysteme und des linearen Übertragungssystems (167) sind mit dem Signaleingang des Verzögerungsgliedes (145) verbunden. Somit werden die Übertragungssysteme (147-151) über eine Signalarückführung und das Dreitor der Dopplerverzerrungen rückführungsfrei gespeist. Durch die Signalarückführung im elektromechanischen Wandlerteil entstehen die bekannten Großsignaleffekte (Amplitudenkompression, Phasenverschiebung der Grundschwingung und der Verzerrungsprodukte). Die durch das Dreitor (145, 167) entstandenen Dopplerverzerrungen beeinflussen das mechanische Schwingungsverhalten (Auslenkung der Membran) und somit den Entstehungsprozeß der nichtlinearen Verzerrungen nicht. Aufgrund der unterschiedlichen Speisung der Übertragungssysteme (rückwirkend, rückwirkungsfrei) besteht das nichtlineare Übertragungssystem (152) aus zwei hintereinandergeschalteten nichtlinearen Teilsystemen.

Die Wirkung dieses nichtlinearen Übertragungssystem (152), d.h. die Entstehung störender nichtlinearer Verzerrungen im Ausgangssignal, läßt sich durch ein ganz bestimmtes Entzerrungssystem vollständig kompensieren, das dem Schallsender vorgeschaltet wird:

Erfindungsgemäß, wird dieses Ziel gerade dadurch erreicht, daß das Entzerrungssystem die Übertragungsglieder S_L (166), S_B (165), S_D (164), S_M (163), S_S (162) und $X(s)$ (161) enthält, die mit den nichtlinearen und linearen Übertragungssystemen des Wandlers (147 - 151, 167) in ihrem Übertragungsverhalten übereinstimmen. Jedes dieser Übertragungsglieder ist mit einem Verknüpfungselement verbunden, das genau die inversen Eigenschaften des Verknüpfungselementes im entsprechenden Wandlerdreitor hat, d.h. statt der Addierer (139, 141 - 143) ergeben sich Subtrahierglieder (156 - 158, 160), statt dem Multiplizierer (140) ein Divisionsglied (159) und das steuerbare Verzögerungsglied (145) führt zu einem Verzögerungsglied mit der entgegengesetzten Steuercharakteristik. Die Verbindung von Übertragungsglied und zugehörigem Verknüpfungselement wird im folgenden als Dreitor bezeichnet.

Alle Dreitore im Entzerrernetzwerk sind genau in der spiegelbildlichen Reihenfolge (bezogen auf die Eingangsklemmen des Wandlers) unter Benutzung eines ihrer Eingänge und ihres Ausganges zu einer Kette verbunden. Der Eingang aller Übertragungsglieder (Zweitore 161 - 166), d.h. der andere Eingang der Dreitore ist mit dem Ausgang des Verzögerungsgliedes verbunden. Somit korrespondiert das rückwirkungsfrei gespeiste Dreitor der Dopplerverzerrungen im Wandler signalfußplan (145, 167) mit einem Entzerrerdreitor (155, 161), das über eine signalarückführung besitzt. Die weiteren elektromechanischen Dreitore, die im Wandler signalfußbild über eine Signalarückführung verbunden waren, korrespondieren mit rückwirkungsfrei geschalteten Dreitoren im Entzerrernetzwerk. Somit besteht das Entzerrernetzwerk ebenfalls aus zwei hintereinandergeschalteten nichtlinearen Teilsystemen.

Nur allein mit dieser Filterstruktur des Entzerrers, die durch Invertierung und Spiegelung der Wandler systemstruktur abgeleitet wurde, kompensieren sich die Dreitore im Wandler und Entzerrernetzwerk vollständig, d.h. die Addition (139) wird durch eine Subtraktion (160) des gleichen Signales im Entzerrer kompensiert, die Multiplikation (140) wird durch das Divisionselement (159) mit dem gleichen Signal im Entzerrer ausgeglichen. In gleicher Weise kompensieren sich alle weiteren Elemente des Störsystems

durch die gespiegelte Verschaltung der inversen Verknüpfungselemente.

So ergibt sich für jeden Typ des elektroakustischen Wandlers eine eineindeutig zugeordenbare Schaltungsstruktur des Entzerrungsnetzwerkes.

Allen diesen Schaltungsstrukturen sind folgende allgemeine Merkmale gemein:

- 5 Das Entzerrernetzwerk besteht aus einer Kettenschaltung (Hintereinanderschaltung) von Übertragungsgliedern, wobei wenigstens ein Übertragungsglied (Zweitor) zwischen seinem Eingangs- und Ausgangstor ein nichtlineares Übertragungsverhalten aufweist.

Überraschenderweise wurde dabei festgestellt, daß eine vollständige Kompensation bestimmter, gleichzeitig wirkender, nichtlinearer Verzerrungsursachen (z.B. Dopplerverzerrungen und Kraftfaktor beim Tieftonlautsprecher oder Kraftfaktor und Dämpfung beim elektrodynamischen Mikrofon) nur durch eine serielle Verknüpfung (Hintereinanderschaltung) mehrerer nichtlinearer Übertragungsglieder möglich ist (vergl. Fig. 1).

Eine Kettenschaltung der Übertragungsglieder des Entzerrungsnetzwerkes bedeutet, daß die Glieder wechselseitig mit ihrem Eingang und Ausgang verknüpft werden und somit in die Übertragungskette (Schallempfänger, Signalspeicher, Sender, Empfänger, Verstärker, Schallsender) eingeschaltet werden. Jedes dieser nichtlinearen Übertragungsglieder (Zweitore Z_1 , Z_2 , Z_3) ist ein gedächtnisloses (frequenzunabhängiges) oder dynamisches (frequenzabhängiges) System.

Jedes dynamische, nichtlineare Zweitor Z enthält mindestens ein Übertragungsdreitor D (vergl. Fig. 2), das mit einer nichtlinearen Verzerrungsursache im Wandler korrespondiert und zur Kompensation der entsprechenden nichtlinearen Verzerrungen dient.

Jedes Dreitor D wiederum ist ein dynamisches, nichtlineares Übertragungsglied mit zwei Signaleingängen E_1 , E_2 und einem Ausgang A (vergl. Fig. 3). Es besteht aus einem nichtlinearen, dynamischen Übertragungsglied (Zweitor U) und einem gedächtnislosen Verknüpfungselement V , das die beiden Eingangssignale über eine algebraische Operation (z.B. Addition, Multiplikation) in das Ausgangssignal überführt. Der eine Eingang E_1 des Dreitors D ist direkt mit dem einen Eingang des Verknüpfungselementes verbunden, der andere Eingang E_2 des Dreitors (D) ist über das Zweitor U mit dem zweiten Eingang des Verknüpfungselementes zusammengeschaltet und der Ausgang des Verknüpfungselementes ist mit dem Ausgang des Dreitors (D) verkoppelt. Das Zweitor U berücksichtigt die physikalischen Eigenschaften des veränderlichen Wandlerparameters und seine Stellung in der Wirkstruktur des Wandlers. Werden zwischen dem Eingang und Ausgang des Zweitores (Z) mehrere Übertragungsdreitore angeordnet (Fig. 2), so sind diese unter Benutzung des jeweiligen Eingangstores E_1 (18) und des Ausgangstores A (20) in einer Kettenschaltung verbunden und das jeweils verbleibende Eingangstor E_2 (19) der enthaltenen Dreitore entweder mit dem Eingangstor des Zweitores Z (Fig. 2 a) oder mit dem Ausgangstor des Zweitores Z (Fig. 2 b) zusammengeschaltet.

Alle dynamischen, nichtlinearen Übertragungsglieder (Zweitore Z , U und Dreitore D) sind aus dynamischen, linearen Zweitoren und/oder gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitoren N und/oder Verknüpfungselementen (z.B. Addierer, Multiplizierer) zusammengesetzt.

Die freien, variablen Parameter der dynamischen, linearen Zweitore (lineare Filterparameter) und der gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitore (nichtlineare Kennlinien) werden durch Messung des resultierenden Übertragungsverhaltens (Wandler mit Entzerrungsnetzwerk), mit Hilfe einer Anpaßanordnung, die zeitweilig oder ständig an das Wandler-Entzerrer-System angeschlossen ist, bestimmt und so das Entzerrungssystem an den jeweiligen Wandler automatisch angepaßt.

Das Entzerrernetzwerk soll zunächst für den elektrodynamischen Schallsender, der in einem Baßreflex- oder Kompaktboxsystem betrieben wird, weiter spezifiziert werden. Ausgehend von einem elektrischen Ersatzschaltbild mit konzentrierten Elementen wird die nichtlineare Integro-Differentialgleichung (IDG) aufgestellt, die Entzerrerübertragungsfunktion bestimmt und in eine Schaltungsanordnung umgesetzt. Das nichtlineare Ersatzschaltbild (vergl. Fig. 7 a) unterscheidet sich vom linearen dadurch, daß strom- und auslenkungsabhängige Parameter bzw. Größen auftreten.

Die Steifigkeit der Membranaufhängung $s_T(x)$ und die Steifigkeit des angekoppelten Luftvolumens $s_B(x)$ wird in einer konstanten Gesamtsteifigkeit s_0 und in einer auslenkungsabhängigen Gesamtsteifigkeit $s_G(x)$ zusammengefaßt

$$s_0 + s_G(x) = s_T(x) + s_B(x). \quad (1)$$

Die Abhängigkeit von der Auslenkung wird auch beim wirkenden elektrodynamischen Wandlerparameter $Bl(x)$, bei der Schwingspuleninduktivität $L(x)$, und bei der elektromagnetischen Antriebskraft $F_{mag}(i, x)$ berücksichtigt.

Die Elemente des mechanisch-akustischen Schwingungssystems, die konstante Parameter aufweisen,

werden in der Impedanz

$$\underline{J}(s) = m \cdot s^2 + z_M \cdot s + s_O + \frac{1}{\frac{1}{m_L \cdot s^2} + \frac{1}{z_L \cdot s} + \frac{1}{s_B}} \quad (2)$$

zusammengefaßt.

Unter Benutzung des Laplaceoperator s , der inversen Laplacetransformation und der Faltungsoperation kann aus dem Ersatzschaltbild bei Speisung mit einer Konstantstromquelle die folgende nichtlineare Gleichung (IDQ) im Zeitbereich aufgestellt werden

$$Bl(x) \cdot i_L(t) = L^{-1}\{\underline{J}(s)\} * x + s_G(x) \cdot x + \frac{1}{2} \cdot i_L(t)^2 \cdot \frac{dL(x)}{dx} \quad (3)$$

Die Multiplikation bzw. Division im Zeitbereich (Punkt) muß von der Faltung unterschieden werden. Durch Vorschalten eines geeigneten Entzerrers mit der Übertragungsfunktion

$$i_L(t) = f[i(t)]$$

soll das Gesamtsystem linearisiert und die folgende lineare Gleichung (IDG) erfüllt werden:

$$Bl_O \cdot i(t) = L^{-1}\{\underline{J}(s)\} * x(t) \quad (4)$$

Das nichtlineare Entzerrernetzwerk muß hierfür die folgende Übertragungsfunktion

$$i_L(t) = \{i(t) + N_s(x) + i(t)^2 \cdot N_M(x)\} \cdot N_B(x), \quad (5)$$

$$\text{mit } x(t) = L^{-1}\{X(s)\} * i(t)$$

besitzen.

Da nach Vorschaltung der Entzerrung das Gesamtsystem die lineare Gleichung (IDG) (4) erfüllt, kann das auslenkungsäquivalente Zeitsignal $x(t)$, das hier als Steuergröße wirkt, durch ein lineares Übertragungsglied (Tiefpaß) mit folgender Übertragungsfunktion

$$\underline{X}(s) = \frac{Bl_O}{\underline{J}(s)} \quad (6)$$

nachgebildet werden.

Für die frequenzunabhängigen, nichtlinearen Funktionen $N_s(x)$, $N_M(x)$ und $N_B(x)$ lassen sich folgende Beziehungen zu den auslenkungsabhängigen Wandlerparametern angeben:

$$N_s(x) = \frac{s_G(x) \cdot x}{Bl_O}, \quad (7)$$

$$N_M(x) = \frac{1}{2Bl_O} \frac{dL(x)}{dx}, \quad (8)$$

$$N_B(x) = \frac{Bl_0}{Bl(x)} \quad (9)$$

5

Das Betreiben des elektrodynamischen Wandler-Systems mit einer Konstantstromquelle bedingt zwar einen höheren Aufwand im Bereich des Leistungsverstärkers durch Einfügen eines Spannung-Strom-Konverters und erfordert zusätzliche Maßnahmen zur Gewährleistung eines ausgeglichenen Schalldruckamplitudenfrequenzganges, vereinfacht jedoch die nichtlineare Entzerrung. Zweckmäßigerweise wird das vorverzerrte Eingangssignal erst unmittelbar am Leistungsverstärker in ein Stromsignal gewandelt.

10

Im Falle der Spannungsspeisung des Wandlers führt die Wirkung des Schwingspulenwiderstandes und der Schwingspuleninduktivität zu einer komplizierteren nichtlinearen Differentialgleichung und einem entsprechend aufwendigeren Entzerrungssystem.

15

Aus dem Ersatzschaltbild ergibt sich bei Spannungsspeisung die folgende nichtlineare Gleichung (IDG):

$$Bl(x) \cdot u_L = R_e \cdot L^{-1}\{J(s)\} * x + R_e \cdot s_G(x) \cdot x + Bl(x) \cdot \frac{d(L(x) \cdot i_L(t))}{dt} + Bl(x)^2 \cdot (L^{-1}\{s\} * x) + \frac{R_e}{2} \cdot i_L(t)^2 \cdot \frac{dL(x)}{dx} \quad (10)$$

20

25

Durch Vorschalten eines geeigneten Entzerrers mit der Übertragungsfunktion

$$u_L(t) = f[u(t)]$$

30

soll das Gesamtsystem linearisiert und die folgende lineare Gleichung (IDG) erfüllt werden:

$$Bl_0 \cdot u = R_e \cdot L^{-1}\{J(s)\} * x + L_0 \cdot L^{-1}\{p \cdot J(s)\} * x + Bl_0^2 \cdot L^{-1}\{s\} * x \quad (11)$$

35

Das nichtlineare Entzerrernetzwerk muß hierfür die folgende Übertragungsfunktion

$$u_L(t) = f[u(t)] = \left\{ u(t) + N_S(x) + N_D(x) \cdot [L^{-1}\{s\} * x] + N_M(x) \cdot i_L(t)^2 \right\} \cdot N_B(x) + \frac{dt[i_L(t) \cdot N_L(x)]}{dt} \quad (12)$$

45

mit

$$x(t) = L^{-1}\{X(s)\} * u(t)$$

50

und

$$i_L(t) = \left\{ L^{-1}\{I(s)\} * x + \frac{N_S(x)}{R_e} \right\} \cdot N_B(x) \quad (13)$$

55

besitzen.

Da nach Vorschaltung der Entzerrung das Gesamtsystem die lineare Gleichung (IDG) (11) erfüllt, kann

das auslenkungsäquivalente Zeitsignal $x(t)$ mit Hilfe eines linearen Systems (Tiefpaß) mit folgender Übertragungsfunktion

$$\underline{X}(s) = \frac{Bl_0}{\underline{J}(s) \cdot (R_e + L_0 \cdot p) + s \cdot (Bl_0)^2} \quad (14)$$

aus dem unverzerrten Eingangssignal $u(t)$ und der Strom $i_L(t)$ unter Benutzung der linearen Übertragungsfunktion

$$I(s) = \frac{\underline{J}(s)}{Bl_0} \quad (15)$$

bestimmt werden.

Für die frequenzunabhängigen, nichtlinearen Funktionen N_s, N_M, N_D, N_L und N_B lassen sich folgende Beziehungen zu den auslenkungsabhängigen Wandlerparametern angeben

$$N_s(x) = \frac{s_G(x) \cdot x \cdot R_e}{Bl_0}, \quad (16)$$

$$N_M(x) = \frac{R_e}{2Bl_0} \frac{dL(x)}{dx}, \quad (17)$$

$$N_B(x) = \frac{Bl_0}{Bl(x)}, \quad (18)$$

$$N_D(x) = \frac{Bl(x)^2}{Bl_0} - Bl_0, \quad (19)$$

$$N_L(x) = L(x) - L_0. \quad (20)$$

Von den nichtlinearen Übertragungsfunktionen (5), (12) lassen sich unmittelbar die Schaltungen des Entzerrers für Strom- und Spannungspeisung ableiten. Die enthaltenen Punktoperationen entsprechen Multiplikationen im Zeitbereich. Die Faltung mit einer konstanten Gewichtsfunktion entspricht einem in den Übertragungsweg geschalteten linearen System (Filter). Die nichtlinearen Funktionen werden durch gedächtnislose, nichtlineare Zweiteore realisiert.

Zur gewünschten Veränderung bzw. Kompensation der auslenkungsabhängigen Steifigkeit enthält das Entzerrernetzwerk ein Dreitor D_s (Fig. 9), das aus einem lineareren, dynamischen Netzwerk X (100), einem gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitor N_s (101) und einem Addierglied (103) besteht. Der Eingang E_2 (22)

des Dreitors ist mit dem Eingang des Zweitores X verbunden. Der Ausgang des Zweitores X, der ein auslenkungsäquivalentes Signal führt, ist über das gedächtnislose, nichtlineare Zweitor N_S mit dem Eingang eines Addierers verbunden. Der zweite Eingang des Addierers ist mit dem Eingang E_1 verschaltet und der Ausgang des Addierers und der Ausgang A des Dreitors D_S sind miteinander verbunden.

5 Zur gewünschten Veränderung bzw. Kompensation der auslenkungsabhängigen elektrodynamischen Kopplungsfaktors enthält das Entzerrernetzwerk ein Dreitor D_B (Fig. 10), das aus einem linearen, dynamischen Netzwerk X, einem gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitor N_B (104) und einem Multiplizierglied (105) besteht. Der Eingang E_2 des Dreitors ist seriell über das lineare Zweitor X und das gedächtnislose, nichtlineare Zweitors N_B mit dem Eingang des Multiplizierers verbunden. Der zweite
10 Eingang des Multiplizierers ist mit dem Eingang E_1 und der Ausgang des Multiplizierers ist mit dem Ausgang A des Dreitors D_S verschalten.

Zur gewünschten Veränderung bzw. Kompensation der auslenkungsabhängigen Dämpfung enthält das Entzerrernetzwerk ein Dreitor D_D (Fig. 11), das aus einem linearen, dynamischen Netzwerk X, einem Differenzierglied (108), einem gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitor N_D (106) und einem Addier- und
15 Multiplizierglied (103, 107) besteht. Der Eingang E_2 des Dreitors ist über das Zweitor X sowohl mit dem gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitores N_D als auch mit dem Eingang eines Differenzierers verbunden. Die Ausgänge des Differenzierers und der gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitores N_D sind über einen Multiplizierer miteinander verknüpft und mit dem Eingang eines Addierers verbunden. Der zweite Eingang des Addierers ist mit dem Eingang E_1 und Ausgang des Addierers und der Ausgang A des Dreitors D_D
20 verschalten.

Zur Kompensation des elektromagnetischen Antriebes enthält das Entzerrernetzwerk ein Dreitor D_M , das aus einem linearen, dynamischen Netzwerk X, einem gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitor N_M (110), einem Quadrier- (108), einem Multiplizier- (109), und einem Addierglied (103) besteht. Der Eingang E_2 des Dreitors ist bei Schallsendern, die über eine Konstantstromquelle gespeist werden (Fig. 13), sowohl direkt
25 mit dem Eingang der Quadrierstufe als auch über das Zweitor X mit dem Eingang des gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitores N_M verbunden. Die Ausgänge des Quadrierers und des Zweitores N_M sind über einen Multiplizierer verknüpft und an den Eingang eines Addierers geführt. Der zweite Eingang des Addierers ist mit dem Eingang E_1 und der Ausgang des Addierers ist mit dem Ausgang A des Dreitors D_M verschaltet.

Wird der Schallsender über eine Spannungsquelle (Fig. 12) betrieben, so wird das Eingangssignal der
30 Quadrierstufe, das dem Eingangsstrom des Wandlers entspricht, mit Hilfe eines nichtlinearen Netzwerkes (111) nach Beziehung (13) erzeugt.

Dazu wird das auslenkungsäquivalente Signal am Ausgang des Zweitores X sowohl an ein lineares Zweitor mit der Übertragungsfunktion $I(s)$ als auch an die gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitore N_S , N_B geführt. Der Ausgang des linearen Zweitores I und der Ausgang des Zweitores N_S werden in einer Addierstufe
35 zusammengefaßt und dem einen Eingang eines Multiplizierers zugeführt. Der andere Eingang des Multiplizierers ist mit dem Ausgang des nichtlinearen Zweitores N_B verbunden. Der Ausgang des Multiplizierers führt das eingangsstromäquivalente Signal.

Zur Kompensation der auslenkungsabhängigen Induktivität eines spannungsgespeisten Schallsenders enthält das Entzerrernetzwerk ein Dreitor D_L (Fig. 14), das aus einem linearen, dynamischen Netzwerk X,
40 einem nichtlinearen Netzwerk (111), einem Differenzierglied (112), einem nichtlinearen Zweitor N_L (110) und einem Multiplizier- (109) und Addierglied (103) besteht. Der Eingang E_2 des Dreitors wird über das lineare Zweitore X mit dem nichtlinearen Zweitor N_L verbunden. Der Ausgang des Zweitores N_L und der Ausgang der oben beschriebenen Stromnachbildung (111) sind mit den Eingängen des Multiplizierers verbunden. Das Ausgangssignal wird über ein Differenzierglied auf den einen Eingang eines Addierers geführt. Der
45 zweite Eingang des Addierers ist mit dem Eingang E_1 und der Ausgang des Addierers ist mit dem Ausgang A des Dreitors D_L verschaltet.

Bei der gleichzeitigen Kompensation des elektrodynamischen Antriebes und anderer Wandlerparameter sind die Kompensationsdreitore mit einem ihrer beiden Eingänge und dem Ausgang in Kette derart zu verschalten, daß außer dem Dreitor D_L der Induktivitätskompensation alle anderen Dreitore eingangsseitig
50 an das Dreitor D_B angeschlossen werden (Fig. 4). Der Ausgang des Kompensationsdreitores D_L ist grundsätzlich an die Wandlereingänge des Schallsenders anzuschließen.

Diese schaltungstechnische Anordnung der Kompensationsdreitore ergibt sich direkt aus der analytischen Struktur der Übertragungsfunktion (große geschweifte Klammer in 5 bzw. 12) und korrespondiert mit der Spiegelsymmetrie zwischen Entzerrerstruktur (Signalflußplan in Fig. 20 a) und der Wirkstruktur (Signalflußplan 7 b) der nichtlinearen physikalischen Mechanismen im elektrodynamischen Lautsprecher.
55 Nur in dieser Reihenfolge können die durch die Auslenkung der Schwingspule bedingten Verzerrungen vollständig kompensiert werden.

Durch die Auslenkung der Membran verändern sich nicht nur die elektrischen und mechanischen

Parameter des Wandlers sondern auch die akustischen Abstrahlungsbedingungen, d.h. der Abstand zwischen der momentanen Membranposition und einem festen Empfangspunkt in der Hauptabstrahlrichtung (Achse) ist auslenkungsabhängig und führt zu einer unterschiedlichen Laufzeit des Signales im akustischen System. Insbesondere hochfrequente Signalanteile mit kurzen Wellenlängen werden durch die entstehende

5 Phasen- oder Frequenzmodulation (bekannt als Dopplereffekt) beeinträchtigt und erzeugen zusätzliche Intermodulationsverzerrungen ([5] G.L. Beers und H.Belar, "Frequency-Modulation Distortion in Loudspeakers", J. Audio Eng. Soc., Band 29, Seite 320 - 326, Mai 1981).

Um auch diese Verzerrungen durch eine Vorverzerrung des elektrischen Speisesignales zu kompensieren, wird dieser Verzerrungsmechanismus ebenfalls modelliert und die erforderliche Übertragungsfunktion des Entzerrungsnetzwerkes abgeleitet und die erforderliche Schaltungsstruktur bestimmt. Der an einem

10 Empfangspunkt in Hauptabstrahlrichtung auftretende Schalldruck $p(t)$ ergibt sich durch Faltung der Auslenkung $x(t)$ der Membran mit der Impulsantwort

$$p(t) = h(t, x(t)) * x(t) \quad (21)$$

15 wobei die Impulsantwort

$$20 \quad h(t, x(t)) = h_0\left(t - T_0 - \frac{x(t)}{c}\right) = h_0(t) * \delta\left(t - T_0 - \frac{x(t)}{c}\right) \quad (22)$$

25 die Abstrahlung und Ausbreitung des akustischen Signales beschreibt und die veränderliche Laufzeit des Signales im akustischen System berücksichtigt.

Mit Hilfe der Diracfunction $\delta(t)$ kann die konstante akustische Impulsantwort $h_0(t)$ von der veränderlichen Laufzeit, die sich aus dem Quotienten von Auslenkung $x(t)$ und Schallgeschwindigkeit c ergibt, separiert werden.

30 In Kombination mit der linearen Übertragungsfunktion des (entzerrten) elektromechanischen Wandlers $X(s)$ kann der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Eingangssignal $u_L(t)$ und dem resultierenden Schalldruck

$$35 \quad p(t) = h_0(t) * L^{-1}\{X(s)\} * \delta\left(t - T_0 - \frac{x(t)}{c}\right) * u_L(t) \quad (23)$$

40 beschrieben werden.

Wird das elektrische Eingangssignal des Wandlers mit der Filterfunktion

$$45 \quad u_L(t) = f(u(t)) = \delta\left(t - T_1 + \frac{x(t)}{c}\right) * u(t) \quad (24)$$

50 vorverzerrt, so lassen sich die Veränderungen der Laufzeit

$$p(t) = h_0(t) * L^{-1}\{X(s)\} * \delta(t - T_0 - T_1) * u(t) \quad (25)$$

und somit die Dopplerverzerrungen in der Hauptabstrahlrichtung kompensieren.

55 Die Übertragungsfunktion des Entzerrers (24) kann mit Hilfe eines Übertragungselementes mit veränderbarer, steuerbarer Laufzeit schaltungstechnisch realisiert werden. Zur Steuerung ist ein auslenkungsäquivalentes Signal $x(t)$ erforderlich. Dieses Signal kann mit Hilfe eines linearen Filters mit der Übertragungsfunktion $X(s)$ aus dem elektrischen Signal $u_L(t)$ gewonnen werden. Betrachtet man dieses Korrektornetzwerk als

ein Dreitor D_T , dessen Eingang E_1 (21) mit dem Signal $u(t)$ gespeist wird und dessen Ausgang A (25) zum Wandler führt, so ist der Steuereingang E_2 (22) mit dem Ausgang A verbunden. Somit zählt das Kompensationsnetzwerk für Dopplerverzerrungen zu den rückwirkenden, rückgekoppelten Schaltungsstrukturen (vergl. Fig. 2 b).

Wirken in dem elektrodynamischen Schallsender weitere nichtlineare Verzerrungsursachen (z.B. Kraftfaktor, Dämpfung, Induktivität), so sind die entsprechenden Kompensationsdreitore (vergl. D_D (15), D_B (16), D_L (17) in Fig. 4) nach dem Kompensationsdreitor der Dopplerverzerrungen (D_T (14)) einzuschalten. Nur so kann das für die Kompensation aller auslenkungsbedingten Verzerrungen erforderliche Steuersignal $x(t)$ mit Hilfe eines linearen Filters aus dem elektrischen Signal gewonnen werden und diese Verzerrungen vollständig unterdrückt werden. Das resultierende Gesamtentzerrungsnetzwerk besteht somit aus einer Kettenschaltung von zwei nichtlinearen, dynamischen Übertragungsgliedern (vergl. Zweitore Z_1 und Z_2 in Fig. 4), wobei im ersten Übertragungsglied, die Verzerrungen des akustischen Systems und im zweiten Glied die Verzerrungen des elektromechanischen Systems kompensiert werden. Auch hier zeigen sich wieder zwischen der Struktur des Entzerrers (Fig. 20 a) und der Wirkstruktur des Wandlers (Signalflußplan Fig. 7 b) vollständige Symmetrieeigenschaften.

Fig. 24 zeigt eine Möglichkeit der Realisierung des Entzerrerdreitors D_T zur Kompensation der Dopplerverzerrungen.

Der Steuereingang E_2 (22) dieses Dreitores ist mit dem Eingang des linearen Filters (100) verbunden, das die Übertragungsfunktion $X(s)$ besitzt und an dessen Ausgang ein auslenkungsäquivalentes Signal $x(t)$ entsteht.

Der Eingang E_1 (21) ist mit dem Eingang eines Verzögerungsgliedes (138) verbunden, an dessen Ausgang das Eingangssignal nach $20 \mu s$ Verzögerung ohne weitere Verzerrungen erscheint. Mit Hilfe von zwei Addierern (136, 134), einem Subtrahierglied (135) und einem Multiplizierglied (137) wird zwischen dem unverzögerten und dem verzögerten Signal entsprechend dem momentanen Zeitsignal $x(t)$ interpoliert.

Durch Ankopplung spezieller Schallführungen an den Schallsender kann der Wirkungsgrad beträchtlich erhöht und die auslenkungsbedingten Verzerrungen vermindert werden. Nichtlineare Strömungs- und Kompressionsvorgänge in der Schallführung können jedoch ebenfalls starke nichtlineare Verzerrungen im abgestrahlten Schall hervorrufen. Zunächst soll der physikalische Hintergrund dieser Mechanismen an Hand einer Modellierung des Schallsenders mit Hornschallführung erläutert und dann die Entzerrerübertragungsfunktion und die korrespondierende Schaltungsstruktur abgeleitet werden.

Am Trichtereingang durchtritt der Schallfluß einen Querschnittsprung, so daß zwischen schwingender Membran und Trichtereingang eine Druckkammer entsteht. Die Parameter der akustischen Elemente Reibung im Trichtereingang Z_K und Nachgiebigkeit der Druckkammer N_D weisen eine Abhängigkeit von akustischen Zustandsgrößen auf. Bei einem sehr großem Schallfluß q_K ist die Strömung am Trichtereingang nicht mehr laminar. Durch die Ausbildung von Turbulenzen entstehen neben der viskosen Reibung weitere Verluste, die zum Anstieg des summarischen Reibungsparameters (Strömungswiderstand) führen.

Der zweite nichtlineare Mechanismus wird durch die (adiabatische) Kompression der Luft in der Druckkammer hervorgerufen. Die Nachgiebigkeit des eingeschlossenen Luftvolumens V nimmt mit zunehmendem Druck p_D in der Kammer ab und kann durch folgende Beziehung beschrieben werden

$$N_D(p_D) = \frac{V \cdot p_O}{x} - \frac{1}{x} \cdot \left(\frac{x+1}{x} \right) \cdot \left(\frac{x}{x+1} + \frac{p_D}{p_O} - \left(1 + \frac{1}{2x} \right) \left(\frac{p_D}{p_O} \right)^2 \right) \quad (26)$$

Werden alle akustischen und mechanischen Elemente auf die elektrische Seite transformiert so läßt sich eine äquivalente elektrische Ersatzschaltung (Fig. 8) angeben. Die linearen Elemente des mechanoakustischen Systems werden in der komplexen Impedanz

$$\underline{W}_2(s) = K^2 \left(m \cdot p + \frac{1}{n_T} + z_M + s_M^2 \cdot \left(Z_{Box} + \frac{1}{N_{Box} \cdot p} \right) \right) \quad (27)$$

zusammengefaßt.

Weiterhin erscheinen die äquivalenten elektrische Größe der akustische Horneingangsimpedanz

$$5 \quad \underline{Z}_H = \frac{K^2}{s_M^2 \cdot \underline{Z}_H} \quad (28)$$

10 und die äquivalenten nichtlinearen Größen der akustische Druckkammernachgiebigkeit

$$15 \quad N_D(i_D) = \frac{(K \cdot s_M)^2}{\mathcal{N}_D\left(\frac{K \cdot i_D}{s_M}\right)} = N_O + N(i_D) \quad (29)$$

20 und der akustischen Dämpfung

$$25 \quad Z_K(u_K) = \frac{K^2}{s_M^2 \mathcal{Z}_K\left(\frac{u \cdot s_M}{K}\right)} = \frac{1}{R_O + R(u_K)}, \quad (30)$$

30 die in einen konstanten Anteil N_O , R_O und einen abhängigen Teil $N(i_D)$ und $R(u_K)$ aufgespalten sind.

Von dem Ersatzschaltbild läßt sich folgende nichtlineare Gleichung (IDG) im Zeitbereich ableiten

$$u_L - L^{-1}\{W(s)\} * (N(i_D) * [u_K * L^{-1}\{Z(s)\}] + N(i_D) * u_K * R(u_K)) - L^{-1}\{F(s)\} * [u_K * R(u_K)] \\ = L^{-1}\{\underline{W}_1(s) * \underline{Z}(s) + W(s) * (\underline{Z}(s) \cdot N_O + 1/s)\} * u_K \quad (31)$$

35 unter Benutzung der Faltungsoperation (*), der inversen Laplacetransformation ($L^{-1}\{\}$), des Laplaceoperators (s) und folgender Summenimpedanzen

$$40 \quad \underline{W}(s) = p \cdot \left(\frac{\underline{W}_1(s)}{\underline{W}_2(s)} + 1 \right), \quad (32)$$

$$45 \quad \underline{F}(s) = N_O * \underline{W}(s) + \underline{W}_1(s), \quad (33)$$

und

$$50 \quad \underline{Z}(s) = R_O + \frac{1}{\underline{Z}_H(s)} \quad (34)$$

Durch Vorschalten eines geeigneten Entzerrers mit der Übertragungsfunktion

$$55 \quad u_L(t) = f[u(t)] \quad (35)$$

soll das Gesamtsystem linearisiert und die folgende lineare Gleichung (IDG) erfüllt werden:

$$u(t) = L^{-1}\{\underline{W}_1(s) \cdot \underline{Z}(s) + \underline{W}(s) \cdot [\underline{Z}(s) \cdot N_o + 1/s]\} * u_K \quad (36)$$

Das nichtlineare Entzerrernetzwerk muß hierfür die folgende Übertragungsfunktion besitzen:

$$u_L(t) = u(t) + L^{-1}\{\underline{W}(s)\} * N_A(i_{D(t)}) + L^{-1}\{\underline{F}(s)\} * N_R(u_{K(t)}) \quad (37)$$

mit

$$i_D(t) = [u_K(t) * L^{-1}\{\underline{Z}(s)\}] + N_R(u_K(t))$$

und

$$u_K(t) = u(t) * L^{-1}\{\underline{Y}(s)\}.$$

Da nach Vorschaltung der Entzerrung das Gesamtsystem die lineare Gleichung (IDG) erfüllt, kann das Steuersignal $u_K(t)$ durch ein lineares System mit folgender Übertragungsfunktion

$$\underline{Y}(s) = \frac{1}{\underline{W}_1(s) \cdot \underline{Z}(s) + \underline{W}(s) \cdot [\underline{Z}(s) \cdot N_o + 1/s]} \quad (38)$$

nachgebildet werden.

Für die frequenzunabhängigen nichtlinearen Funktionen lassen sich folgende Beziehungen

$$N_A(i_D) = N(i_D) \cdot i_D, \quad (39)$$

$$N_R(u_K) = u_K \cdot R(u_K) \quad (40)$$

zu den Wandlerparametern angeben.

Die nichtlineare Übertragungsfunktion des Entzerrers läßt sich unmittelbar in eine Schaltung umsetzen. Die Faltungsoperationen werden durch lineare Filter mit den Übertragungsfunktionen $Y(s)$, $F(s)$, $Z(s)$, $W(s)$ und die nichtlinearen Funktionen N_A und N_R werden durch gedächtnislose, nichtlineare Übertragungssysteme realisiert. Die Verknüpfung der Signale erfolgt entsprechend der algebraischen Struktur der Entzerrfunktion (32) mit Addierern und Multiplizierern.

So ergibt sich für das Dreitor D_A (Fig. 15), das eine gewünschte Veränderung bzw. Kompensation der adiabatischen Kompression in der angekoppelten Schallführung eines Schallsenders bewirkt, die folgende Struktur: Der Eingang E_2 des Dreitors D_A ist über ein Übertragungsglied (115) mit dem Eingang eines gedächtnislosen, nichtlinearen Übertragungsgliedes N_A (114) verbunden. Der Ausgang des Zweitores N_A ist über den linearen Übertragungszweitor W (113) mit dem ersten Eingang eines Addierers (103) und der zweite Eingang des Addierers ist mit dem Eingang E_1 des Dreitors verbunden. Der Ausgang des Addierers ist mit dem Ausgang A des Dreitors D_A zusammengeschaltet.

Für das Dreitor D_R (Fig. 16), das eine gewünschte Veränderung bzw. Kompensation der schnelleabhängigen Strömungsverluste in der angekoppelten Schallführung eines Schallsenders bewirkt, ergibt sich die folgende Schaltungsstruktur: Der Eingang E_2 des Dreitors D_R ist über ein lineares, dynamisches Übertragungsglied Y (118) mit dem Eingang eines gedächtnislosen, nichtlinearen Übertragungsgliedes N_R (119) verbunden. Der Ausgang des Zweitores N_R ist über das lineare Übertragungsglied F (120) mit dem ersten Eingang eines Addierers (103) und der zweite Eingang des Addierers ist mit dem Eingang E_1 des Dreitors verbunden. Der Ausgang des Addierers ist mit dem Ausgang A des Dreitors D_R zusammengeschaltet.

Die Schaltung kann auf Kosten der Genauigkeit der Kompensation in bestimmten Frequenzgebieten stark vereinfacht werden. Unter Benutzung der Beziehungen

$$\underline{Z}(s) < \underline{W}_1(s) < \underline{W}_2(s), \quad (41)$$

$$\underline{Z}(s) < R_o, \quad (42)$$

Realteil $\{ \underline{Z}_H(s) \} < \text{Imaginärteil} \{ \underline{Z}_H(s) \}, \quad (43)$

kann das lineare Netzwerk

$$\underline{W}(s) \approx s \quad (44)$$

als einfacher Differenzierer und die linearen Netzwerke

$$\underline{F}(s) \approx \underline{W}_1(s) \approx \text{Realteil}(\underline{W}_1(s)) = R_1 \quad (45)$$

$$\underline{Z}(s) \approx \frac{1}{Z_O} \quad (46)$$

$$\underline{Y}(s) \approx \frac{Z_O}{R_1 + Z_O} \quad (47)$$

können als einfache, frequenzunabhängige Verstärker ausgeführt werden.

Der elektrodynamische Schallempfänger (Mikrofon) erzeugt bei großem Schalldruck im unteren Frequenzbereich ebenfalls nichtlineare Signalverzerrungen. Der physikalische Hintergrund wird zunächst an Hand einer Modellierung des elektrodynamischen Sensors mit konzentrierten elektrischen und mechanischen Elementen erläutert und daran anschließend das Entzerrernetzwerk abgeleitet.

Alle wirksamen akustischen Elemente des Sensors werden durch äquivalente mechanische Elemente beschrieben. Mit Hilfe einer Membran mit der Fläche S_M wird ein Schalldrucksignal $p_m(t)$ in ein Kraftsignal $F(t)$ gewandelt, das das mechanische Schwingungssystem antreibt.

Die Steifigkeit der Membranaufhängung $s_T(x)$ und die Steifigkeit des angekoppelten Luftvolumens $s_B(x)$ wird in einer konstanten Gesamtsteifigkeit s_o und in einer auslenkungsabhängigen Gesamtsteifigkeit $s_G(x)$ zusammengefaßt.

$$s_o + s_G(x) = s_T(x) + s_B(x) \quad (48)$$

Die Abhängigkeit von der Auslenkung wird auch beim wirkenden elektrodynamischen Wandlerparameter $Bl(x)$ berücksichtigt und die akustisch-mechanische Gesamtdämpfung in einen konstanten Teil z_o und in einen auslenkungsabhängigen Teil $z(x)$ aufgespalten.

Alle Elemente des mechanisch-akustischen Schwingungssystems, die konstante Parameter aufweisen, werden in der mechanischen Impedanz

$$\underline{z}(s) = mp + z_o + \frac{s_o}{s} + \dots \quad (49)$$

zusammengefaßt.

Der an den Sensor angeschlossene Verstärker soll einen ausreichend hohen Innenwiderstand aufweisen, so daß der Widerstand und die Induktivität der Schwingspule vernachlässigt werden kann.

Unter Benutzung des Laplaceoperator s , der inversen Laplacetransformation und der Faltungsoperation kann die nichtlineare Gleichung (IDG) im Zeitbereich aufgestellt werden

$$F(t) = v(t) \cdot L^{-1}\{\underline{z}(s)\} + v(t) \cdot z(x(t)) + x(t) \cdot s_G(x(t)) \quad (50)$$

Die Kraft F ist hierbei die Eingangsgröße des Wandlers und die Schwingspulenauslenkung x wirkt als parameterverändernde Zustandsgröße. Die Spannung an den Wandlerklemmen ergibt sich aus

$$u_L(t) = v(t) \cdot Bl(x(t)) \quad (51)$$

Durch Nachschalten eines geeigneten Entzerrers mit der Übertragungsfunktion

$$u(t) = f[u_L(t)] \quad (52)$$

soll das Gesamtsystem linearisiert und die folgende lineare Gleichung (IDG) erfüllt werden

$$u(t) = Bl_O \cdot F(t) * L^{-1} \left\{ \frac{1}{z(s)} \right\} \quad (53)$$

Das nichtlineare Entzerrernetzwerk muß hierfür die folgende Übertragungsfunktion im Zeitbereich

$$u(t) = u_B + L^{-1} \{ Q(s) \} * [u_B \cdot N_{ZE} (L^{-1} \{ \frac{1}{s} \} * u_B) + N_{SE} (L^{-1} \{ \frac{1}{s} \} * u_B)] \quad (54)$$

mit den Abkürzungen

$$Q(s) = \frac{1}{z(s)}$$

und

$$u_B = N_{BE} (L^{-1} \{ \frac{1}{s} \} * u_L(t))$$

besitzen. Aus den abhängigen Parametern des Sensors ergeben sich die frequenzunabhängigen, nichtlinearen Funktionen

$$N_{SE} = f(x) = \frac{s_G(x) \cdot x}{Bl_O}, \quad (55)$$

$$N_{ZE} = f(x) = \frac{z(x)}{Bl_O}, \quad (56)$$

$$N_{BE} = f(x) = \frac{Bl_O}{Bl(N_U(x))}, \quad (57)$$

wobei die Hilfsfunktion $N_U(x)$ der Beziehung

$$B1(N_U(x)) \cdot \frac{dN_U(x)}{dx} = 1 \quad (58)$$

5 genügt.

Die nichtlineare Übertragungsfunktion des Entzerrers läßt sich unmittelbar in eine Schaltung umsetzen. Diese Schaltung ist eine Kettenschaltung zweier nichtlinearer, dynamischer Zweitore Z_2 und Z_3 . Das Zweitor Z_2 , das unmittelbar dem Schallempfänger folgt, enthält das Dreitor D_{BE} zur Kompensation des elektrodynamischen Koppelfaktors. Das an den Ausgang des Dreitors D_{BE} angeschlossene zweite Zweitor enthält die Dreitore zur Kompensation der auslenkungsabhängigen Dämpfung und der Steifigkeit.

Das Dreitor D_{BE} (Fig. 19) bewirkt eine Kompensation des auslenkungsveränderlichen, Kopplungsparameters. Der Eingang E_2 des Dreitors ist seriell über ein Integrierglied (129), ein seriell angekoppeltes gedächtnisloses, nichtlineares Übertragungsglied N_{BE} (130) mit dem einen Eingang eines Multiplizierers (131) verbunden. Der Eingang E_1 ist mit dem zweiten Multiplizierereingang und der Ausgang des Multiplizierers ist mit dem Ausgang A des Dreitors D_{BE} zusammengeschaltet.

Das Dreitor D_{SE} (Fig. 17) bewirkt eine gewünschte Veränderung bzw. Kompensation der auslenkungsveränderlichen Steifigkeit der Membranaufhängung. Der Eingang E_2 des Dreitors D_{SE} ist über ein Integrierglied (123), ein gedächtnisloses, nichtlineares Übertragungsglied N_{SE} (122) und ein lineares Zweitor Q (121) mit dem einen Eingang eines Addierers (103) verbunden. Der zweite Eingang des Addierers ist mit dem Eingang E_1 und der Ausgang des Addierers ist mit dem Ausgang A des Dreitors D_{SE} zusammengeschaltet.

Das Dreitor D_{DE} (Fig. 18) bewirkt eine gewünschte Veränderung bzw. Kompensation des auslenkungsveränderlichen Steifigkeit der Membranaufhängung. Der Eingang E_2 des Dreitors D_{DE} ist sowohl direkt mit dem einen Eingang eines Multiplizierers (107) als auch über die Kettenschaltung eines Integriergliedes (126) und eines gedächtnislosen, nichtlinearen Übertragungsgliedes N_{DE} (128) mit dem zweiten Eingang des Multiplizierers verbunden. Der Ausgang des Multiplizierers ist über ein lineares Zweitor Q (121) mit dem Eingang eines Addierers verbunden, der zweite Eingang des Addierers ist mit dem Eingang E_1 und der Ausgang des Addierers ist mit dem Ausgang A des Dreitors D_{DE} zusammengeschaltet.

Beim elektrostatische Sensor (Kondensatormikrofon) entstehen die nichtlinearen Signalverzerrungen durch das Wirken einer konstanten Parallelkapazität C_p , durch die auslenkungsabhängige elektrische Anziehung zwischen Membran und Gegenelektrode und durch die auslenkungsabhängige Nachgiebigkeit des Luftpolsters oder der Membran.

Diese Nichtlinearitäten lassen sich ebenso durch ein Entzerrernetzwerk nach dem beschriebenen Grundaufbau kompensieren. Die Membran mit der Fläche S_M wandelt das Schalldrucksignal $p_m(t)$ in ein Kraftsignal $F(t)$, das im interessierenden Frequenzbereich auf die Gesamtnachgiebigkeit wirkt.

Im Hinblick auf das Entzerrernetzwerk sollen die Steifigkeiten der Membran $s_T(x)$, des angekoppelten Luftpolsters $s_B(x)$ und die Wirkung der elektrischen Anziehungskraft in einer konstanten Gesamtsteifigkeit s_0 und in einer auslenkungsabhängigen Gesamtsteifigkeit $s_G(x)$

$$s_0 + s_G(x) = s_T(x) + s_B(x) + s_A(x, U_0). \quad (59)$$

zusammengefaßt werden.

Zwischen der Membran und der Gegenelektrode des elektrostatische Sensors sei eine Polarisationsspannung U_0 aufgebaut und der Eingangswiderstand des angekoppelten Verstärkers sei so hoch, daß bei den interessierenden Signalfrequenzen keine Ladungen abfließen können. Zusätzlich zu der Kapazität C_0 zwischen Membran und Gegenelektrode, die durch die Auslenkung der Membran gesteuert wird, wirkt eine zweite konstante Parallelkapazität C_p .

So ergibt sich für den Zusammenhang zwischen Auslenkung x und Signalausgangsspannung

$$u_L(t) = U_0 \cdot \left(\frac{C_0 + C_p}{C_p + C_0 \cdot \frac{x_0 - x}{x_0}} - 1 \right). \quad (60)$$

Durch Nachschalten eines geeigneten Entzerrers mit der Übertragungsfunktion

$$u(t) = f[u_L(t)] \quad (61)$$

soll das Gesamtsystem linearisiert und die folgende lineare Übertragungsfunktion

$$u(t) = \frac{U_O \cdot F(t)}{x_O \cdot s_O} \quad (62)$$

erfüllt werden. Das nichtlineare Entzerrernetzwerk muß hierfür die folgende Übertragungsfunktion im Zeitbereich besitzen.

$$u(t) = N_K(u_L(t)) = \frac{U_O \cdot x}{x_O} \left(1 + \frac{s_G(x)}{s_O} \right) \quad (63)$$

mit

$$x = x_O \cdot \left(1 + \frac{c_p}{c_O} \right) \cdot \left(1 - \frac{U_O}{u_L(t)} \right)$$

Das Entzerrernetzwerk ist frequenzunabhängig und entspricht einem einfachen gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitor.

Nachdem nun für verschiedene elektroakustische Wandler die Schaltungsstruktur der nichtlinearen Entzerrernetzwerke entwickelt wurde, soll nun auch das Problem der Anpassung dieser Entzerrernetzwerke an den Wandler gelöst werden. Die nichtlinearen Verzerrungen im Gesamtsystem können nur unter 1 % gesenkt werden, wenn die Kennlinien in den gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitoren mindestens in der gleichen Größenordnung an die Optimalwerte geführt werden.

Erfindungsgemäß weist das Entzerrernetzwerk veränderliche Eigenschaften auf, d.h. über mindestens einen Steuereingang können die Parameter des Entzerrernetzwerkes insbesondere die nichtlinearen, gedächtnislosen Zweitore verändert werden. An den Steuerleitungen der Parametersteuerung sind Hilfsmittel zur Speicherung des eingestellten Steuerwertes (Halteschaltungen) um auch nach Bendigung des Anpaßvorganges die ermittelte Parametereinstellung zu bewahren. Zur Anpassung des Netzwerkes wird ein weiteres schaltungstechnisches Hilfsmittel aktiviert. Es besteht aus einem Generierungsteil zur Erzeugung eines Anregungssignales und aus einem Analyseteil zur Erfassung und Auswertung eines Meßsignales und zur Erzeugung von Steuersignalen für die Einstellung der Entzerrernetzparameter.

Die Anpaßanordnung kann als Regelschaltung oder als Steuerschaltung ausgeführt werden.

Bei der Steuerschaltung ist eine getrennte Anpassung möglich, bei der der Wandler zunächst ohne Entzerrernetzwerk mit der Anpaßanordnung zu einer Meßkette verschalten ist und die nichtlinearen Wandlerparameter bestimmt und in den Halteschaltungen gespeichert werden. Nach der Messung der Wandlerparameter wird das Entzerrernetzwerk an den Wandler wieder angekoppelt und die Ausgänge der Halteschaltungen mit den Steuereingängen des Entzerrernetzwerkes verbunden.

Vorteilhafter erscheint eine gleichzeitige Anpassung, bei der das Generierungsteil mit dem Wandler-Entzerrer-System und dem Analyseteil zu einer Meßkette verschalten sind.

Der Ausgang des Analyseteil ist mit dem Steuereingang des Entzerrernetzwerkes verbunden, so daß die Steuersignale, die im Analyseteil erzeugt werden, die Parameter des Entzerrernetzwerkes verändern und das System an den Wandler anpassen. Ein Hauptsteuersystem übernimmt während des Anpaßvorganges die Kontrolle und Steuerung der Teilsysteme.

Bei der Anpassung von Entzerrernetzwerken an Schallsender wird das Generierungsteil über das Entzerrernetzwerk mit den Eingangsklemmen des Wandlers verbunden. Das Meßsignal kann über eine Impedanzmessung oder über eine akustische Messung abgeleitet werden. Die akustische Messung erfordert zwar einen zusätzlichen Schallempfänger, vermindert jedoch den technischen Aufwand im nachfolgenden

den Analyseteil.

Für die praktische Realisierung ist es erstrebenswert, nur eine Parameterveränderung von nichtlinearen, gedächtnislosen Zweitoren im Entzerrernetzwerk vorzunehmen und eine Veränderung der linearen, frequenzabhängigen Zweitorparameter weitestgehend zu vermeiden. Beim elektrodynamischen Schallsender kann durch die vorhandenen Dreitore der Dämpfungs- und Steifigkeitskompensation die Gesamtanordnung an das Übertragungsverhalten des Zweitores X angepaßt werden. Dadurch kann der Anpaßaufwand gesenkt und gleichzeitig ein gewünschtes lineares Gesamtübertragungsverhalten realisiert werden.

Im Analyseteil werden aus dem aufgenommenen Meßsignal (Mikrofonsignal) die einzelnen Verzerrungskomponenten mit einer Spektral- oder Korrelationsanalyse separiert und die Steuersignale abgeleitet.

Bei der Korrelationsanalyse ist es zunächst erforderlich, das Anregungssignal vom Generierungsteil in das Analyseteil zu überführen, und aus dem Anregungssignal Referenzsignale zu bilden. Dazu wird das Anregungssignal über nichtlineare, dynamische Zweitore geführt, die die nichtlinearen Verzerrungsursachen des Wandler synthetisch nachbilden und einzelne Verzerrungskomponenten separieren. Die Frequenz und Phasenlage der Referenzsignale, nicht aber ihre Amplitude ist für die Korrelationsanalyse wichtig. Das Meßsignal und jeweils ein Referenzsignal wird an die beiden Eingänge des Korrelators geführt. Der Korrelator besteht aus einem Multiplizierer und einem nachgeschalteten Tiefpaß. Das Korrelationssignal wird unmittelbar zur Steuerung des Entzerrernetzwerkes benutzt.

Der Anpaßprozeß wird bei verschiedenen Signalaussteuerungen vorgenommen, um eine möglichst gute Übereinstimmung und letztlich Kompensation im Klein- und Großsignalbereich zu erzielen. Bei einem schrittweise wachsenden Anregungssignal können die für geringere Aussteuerung bestimmten optimalen Entzerrerparameter übernommen und nur die für den erweiterten Aussteuerungsbereich relevanten Kurvenabschnitte verändert werden.

Für den Fall, daß das Wandler-Entzerrersystem seine Aussteuerungsgrenzen erreicht hat und zum Beispiel die Auslenkung der Schwingspule oder die zugeführte und in Wärme umgesetzte Leistung zur Zerstörung des Wandlers führen kann, empfiehlt sich die Anordnung eines nichtlinearen, dynamischen Zweitores Z_{SS} im Entzerrernetzwerk. Das Zweitor Z_{SS} hat die gleiche Struktur, wie die anderen nichtlinearen Entzerrerbausteine. Es enthält nichtlineare, dynamische Dreitore D_{SS} zur Aussteuerungsbegrenzung und zur Leistungsbegrenzung.

Zwischen dem Eingang E_1 und dem Ausgang A der Dreitore ist ein steuerbares, nichtlineares Netzwerk H geschaltet, das zum Beispiel eine Hochpaßcharakteristik besitzt. Der Eingang E_2 ist über ein lineares Netzwerk O, über ein gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor N_0 und über ein weiteres lineares Zweitor B mit dem Steuereingang des Zweitores H verbunden.

Zur Realisierung des Auslenkungsschutzes besitzt das lineare Zweitor O die Übertragungsfunktion $X(s)$ und erzeugt ein auslenkungsäquivalentes Signal. Das nichtlineare Zweitor N_0 ist ein Gleichrichter und das nachgeschaltete Zweitor besitzt eine Tiefpaßcharakteristik.

Zur Begrenzung der Verlustleistung im Wandler besitzt das lineare Zweitor O eine aus der elektrischen Eingangsimpedanz abgeleiteten Übertragungsfunktion. Das nichtlineare Zweitor N_0 enthält einen Quadrierer und das nachfolgende lineare Zweitor B ist ein Integrator, dessen Integrationszeit mit der Aufheizzeit (bestimmt durch Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit) des Wandlers korrespondiert.

Durch eine Veränderung der linearen Übertragungseigenschaften des Zweitores H (z. B. Absenkung der Baßsignale durch einen Hochpaß) wird beim Erreichen der Aussteuerungsgrenze (max. Auslenkung, max. Verlustleistung) eine Zerstörung des Wandlers bzw. die Erzeugung nichtlinearer Verzerrungen vermieden.

In den Zeichnungen zeigen

Fig. 1: das Prinzipschaltbild der erfindungsgemäßen Lösung des Entzerrernetzwerk für den Schallsender (a) und den Schallempfänger (b),

Fig. 2 a rückwirkungsfreie Zusammenschaltung einzelner nichtlinearer, dynamischer Dreitore D zu einem Zweitor Z, Fig. 2 b: rückwirkende Zusammenschaltung einzelner nichtlinearer, dynamischer Dreitore D zu einem Zweitor Z,

Fig. 3: Innenaufbau eines nichtlinearen, dynamischen Dreitors D,

Fig. 4: Struktur des Entzerrernetzwerkes für einen elektrodynamischen Schallsender,

Fig. 5: Struktur des Entzerrernetzwerkes für ein elektrodynamisches Mikrofon,

Fig. 6: Struktur des Entzerrernetzwerkes für ein Kondensatormikrofon,

Fig. 7 a: elektromechanisches Ersatzschaltbild für einen elektrodynamischen Schallsender,

Fig. 7 b: Beschreibung des Übertragungsverhaltens eines elektrodynamischen Schallsender mit einem Signalfußplan,

Fig. 8: Ersatzschaltbild des elektroakustischen Wandlers mit Hornschallführung (Druckkammerlautsprecher),

Fig. 9: Dreitor D_S zur Kompensation der auslenkungsabhängigen Steifigkeit bei einem Schallsender,

Fig. 10: Dreitor D_B zur Kompensation der auslenkungsabhängigen, elektrodynamischen Antriebes bei einem Schallsender,

Fig. 11: Dreitor D_D zur Kompensation der auslenkungsabhängigen Dämpfung bei einem Schallsender,

Fig. 12: Dreitor D_{MU} zur Kompensation des elektromagnetischen Antriebes bei einem Schallsender mit Konstantspannungsspeisung,

Fig. 13: Dreitor D_{MI} zur Kompensation des elektromagnetischen Antriebes bei einem Schallsender mit Konstantstromspeisung,

Fig. 14: Dreitor D_L zur Kompensation der auslenkungsabhängigen Induktivität bei einem Schallsender,

Fig. 15: Dreitor D_A zur Kompensation der adiabatischen Kompression in der angekoppelten Schallführung eines Schallsenders,

Fig. 16: Dreitor D_R zur Kompensation der turbulenten Strömung in der angekoppelten Schallführung eines Schallsenders,

Fig. 17: Dreitor D_{SE} zur Kompensation der auslenkungsabhängigen Steifigkeit eines elektrodynamischen Schallempfängers, Fig. 18: Dreitor D_{DE} zur Kompensation der auslenkungsabhängigen Dämpfung eines elektrodynamischen Schallempfängers,

Fig. 19: Dreitor D_{BE} zur Kompensation des auslenkungsabhängigen, elektrodynamischen Antriebes bei einem Schallempfänger,

Fig. 20 a: Grobstruktur (Signalflußplan) eines Entzerrungssystems für den elektrodynamischen Lautsprecher,

Fig. 20 b: Ausführungsbeispiel für ein Entzerrernetzwerk für einen elektrodynamischen Lautsprecher zur Kompensation der auslenkungsabhängigen Steifigkeit, Dämpfung und des Kopplungsfaktors,

Fig. 21: Ausführungsbeispiel für ein steuerbares, gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor,

Fig. 22: Prinzipschaltbild der Anordnung zur selbständigen, automatischen Anpassung des Entzerrernetzwerkes an den Wandler,

Fig. 23: Ausführungsbeispiel für die automatische Anpaßanordnung.

Fig. 24: Dreitor D_T zur Kompensation der auslenkungsabhängigen Laufzeit (Dopplereffekt) bei einem Schallsender,

In den Zeichnungen verkörpern die Ziffern folgende Elemente: Entzerrernetzwerk (1), Schallsender (2), Schallempfänger (3), lineare und nichtlineare Übertragungssysteme (4, 5, 6, 8, 9, 10), Verstärker (7), Eingang des Zweitores Z (11), Ausgang des Zweitores Z (12), nichtlineare, dynamische Übertragungsdreitore D (14, 15, 16, 17), Eingänge des ersten Dreitores (18, 19), Ausgang des letzten Dreitores (20), Eingang E_1 des Dreitores D (21), Eingang E_2 des Dreitores D (22), nichtlineares Übertragungssystem U (23), Verknüpfungselement (24), Ausgang A des Dreitors D (25), gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor N_K (26), Entzerrernetzwerk (27), Multiplizierer (28, 33), Addierer (29, 30), Eingang des Entzerrers (31), Ausgang des Entzerrers (32), lineares Netzwerk mit der Übertragungsfunktion $X(s)$ (34), gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor (35, 37, 38), Differenzierer (36), Steuereingänge zur Parameterveränderung (39, 40, 41), Steuereingang zur Arbeitspunktumschaltung (42), Relais (43), Umschalter (44, 45, 46), Eingang des veränderbaren, gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitores N (47), Halteschaltungen (48, 49, 50, 51, 52), Addierer (53, 54, 55, 56), Multiplizierer (57, 58, 59), spannungsgesteuerte Verstärker (60, 61, 62, 63), Ausgang des nichtlinearen Zweitores N (64), Tongeneratoren (65, 66), Addierer (67), lineares Netzwerk mit der Eingangsspannung-Auslenkung-Übertragungsfunktion des Wandlers (68, 69), Multiplizierer (70, 71, 72), lineare Netzwerke mit der Übertragungsfunktion des Wandlers (73, 74), Generierungsteil (75), Analyseteil (76), Multiplizierer (77, 78, 79, 80), Tiefpässe (81, 82, 83, 84), Differenzierer (85, 86), Umschalter (87), Relais (88), Hauptsteuersystem (89), spannungsgesteuerter Verstärker VCA (91), Audioeingang (93), Multiplizierer (95), Dreitor D_{MI} zur Kompensation des elektromagn. Antriebes bei Konstantspannungsspeisung (96), Dreitor D_{MU} zur Kompensation des elektromagn. Antriebes bei Stromspeisung (97), Dreitor D_L zur Induktivitätskompensation (98), Dreitor D_S zur Steifigkeitskompensation (99), lineares Netzwerk X zur Nachbildung der Auslenkung (100), gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor N_S (101), Dreitor D_B zur elektrodyn. Antriebskompensation (102), Addierer (103), gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor N_B (104), Multiplizierer (105), gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor N_D (106), Multiplizierer (107), Differenzierer (108), Dreitor D_D zur Dämpfungskompensation (109), gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor N_M (110), dynamisches Zweitor zur Nachbildung des Wandlereingangstromes (111), Differenzierer (112), lineares Netzwerk W (113), gedächtnisloses, nichtlineares Netzwerk N_A (114), dynamisches Zweitor (115), Dreitor D_A zur Kompensation der adiabatischen Kompression (116), Dreitor D_R zur Kompensation der turbulenten Strömung (117), lineares Netzwerk Y (118), gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor N_R (119), lineares Netzwerk F (120), lineares Netzwerk Q (121), gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor N_{SE} (122), Integrator $1/s$ (123), Dreitor D_{SE} zur Steifigkeitskompensation (124), Dreitor D_{DE} zur Dämpfungskompensation (125), Integrator $1/s$ (126), gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor N_{DE} (128), Integrierer (129), gedächtnisloses, nichtlineares Zweitor N_{BE} (130), Multipli-

zierer (131), Dreitor D_{BE} zur Kompensation des elektrodyn. Antriebes (132), Dreitor D_T zur Kompensation der auslenkungsabhängigen Laufzeit im akustischen System, Addierer (134), Subtrahierer (135), Addierer (136), Multiplizierer (137), Verzögerungsglied mit konstanter Verzögerungszeit (138), Addierer (139), Multiplizierer (140), Addierer (142 - 143), lineares Übertragungssystem $X(s)$ (144), Übertragungsglied mit veränderlicher, steuerbarer Laufzeit (145), lineares Übertragungssystem (146), nichtlineares Übertragungssysteme (147 - 152), lineares Übertragungssystem (153), Signaleingang (154), Verzögerungsglied mit entgegengesetzter Steuercharakteristik (155), Subtrahierglieder (156 - 158, 160), Dividierglied (159), lineares Übertragungssystem (161), nichtlineare Übertragungsglieder (162 - 166), lineares Übertragungssystem (167), Quadrierer (168), Multiplizierer (169).

Die Erfindung soll im folgenden an einem Ausführungsbeispiel und anhand der Figuren 20, 21, 22 und 23 näher erläutert werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde ein einfaches Beispiel gewählt. Das Prinzip ist auf andere und mehrere Parameter sinngemäß übertragbar. Ein elektrodynamischer Konuslautsprecher (2), montiert in ein Kompaktgehäuse, wird über eine Konstantstromquelle gespeist. Der elektrodynamische Antrieb erweist sich bei diesem Lautsprecher als die entscheidende Verzerrungsursache, so daß nur ein nichtlinearer Wandlerparameter kompensiert werden muß. Das benutzte Entzerrernetzwerk ist in Fig. 20 dargestellt. Es erlaubt eine Korrektur des elektrodynamischen Antriebes, der Dämpfung und der Steifigkeit der Wandlerparameter. Das Netzwerk enthält einen linearen Tiefpaß (34) zweiter Ordnung $X(s)$, ein Differenzierglied s (36), drei gedächtnislose, nichtlineare Zweitore N_S (35), N_B (38), N_D (37) und drei Multiplizierer (33, 28, 95) und zwei Addierstufen (29, 30). Der Eingang des Addierers (30) und der Eingang des Tiefpasses X (34) sind an den Eingang (31) des Entzerrernetzwerkes angeschlossen. Der Ausgang des Tiefpasses X (34), der ein auslenkungsäquivalentes Signal führt, ist sowohl mit allen Eingängen der gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitore (35, 37, 38) und des Differenziergliedes (36) als auch mit dem einen Eingang des Multiplizierers (95) verbunden. Der zweite Eingang des Multiplizierers (95) ist mit dem Ausgang des nichtlinearen Zweitores N_S (35) verknüpft. Der Ausgang des Multiplizierers (95) wird im Addierer (30) mit dem unverzerrten Signal überlagert. Der Ausgang des Differenziergliedes (36) und der Ausgang des nichtlinearen Zweitores N_D (37) sind an die Eingänge des Multiplizierers (33) angeschlossen. Der Ausgang des Multiplizierers wird über das Addierglied (29) mit dem vorverzerrten Signal verknüpft und zu dem einen Eingang des Multiplizierers (28) geführt. Der zweite Eingang des Multiplizierers (28) ist mit dem Ausgang des gedächtnislosen Zweitors N_B (38) verbunden. Der Ausgang des Multiplizierers (28) ist über einen Verstärker (7) mit Konstantstromspeisung mit dem Lautsprecher verbunden.

Das lineare Netzwerk ist als aktives RC-Filter aufgebaut. Die Güte und die Resonanzfrequenz des Tiefpasses $X(s)$ zweiter Ordnung wird entsprechend dem gewünschten linearem Übertragungsverhalten festgelegt. Mit Hilfe der in der Entzerrerschaltung enthaltenen Dreitore D_D und D_S kann für beliebige Lautsprecher mit unterschiedlicher Resonanzfrequenz und Güte das Gesamtsystem auf die geforderten linearen Eigenschaften korrigiert werden. Die Übereinstimmung zwischen Tiefpaßfunktion $X(s)$ und linearem Übertragungsverhalten der Gesamtanordnung ist eine notwendige Voraussetzung für Funktionstüchtigkeit des nichtlinearen Entzerrers.

Da in dem vorliegenden Beispiel der Lautsprecher keine Steifigkeits- und Dämpfungs nichtlinearitäten aufweist, werden nur konstante Werte in den Zweitore N_S (35) und N_D (37) abgelegt. Die nichtlineare Kennlinie des gedächtnislosen Zweitors N_B (38) muß jedoch an den Wandler angepaßt werden.

Jedes dieser gedächtnislosen nichtlinearen Zweitore besteht nach Fig. 21 aus einer Parallelschaltung von einzelnen Zweigen, wobei jeder Zweig ein Potenzierglied (57, 58, 59) und einen spannungsgesteuerten Verstärker (60, 61, 62, 63) enthält, die über ein Addierglied (53, 54, 55, 56) vor dem Ausgang (64) zusammengefaßt werden. Entsprechend der Taylorreihenentwicklung nimmt die Ordnung der Potenzen von Zweig zu Zweig schrittweise zu und die Verstärkungsveränderung der VCA ermöglicht die Approximation einer beliebigen Kurvenform. An die Steuereingänge der Verstärker ist eine Halteschaltung (48, 49, 50, 51, 42) angeschlossen, die die optimal eingestellte Steuerspannung nach dem Anpassungsvorgang speichert. Die Steuerspannung der linearen (49, 60) und kubischen Zweige (51, 58, 62) verändern die Unsymmetrie der Kennlinie. Wird die Verstärkung in den Potenziergliedern gerader Ordnung (61, 63) erhöht, nehmen die symmetrischen Kennlinienveränderungen zu.

Die Steuerleitungen der geraden und ungeraden Systeme sind jeweils an einen Umschalter (44, 45, 46) zusammengeführt die vom Hauptsteuerwerk (89) über das Relais (43) gleichzeitig geschaltet werden. Die Läufer der Umschalter führen zu den konstanten (39), symmetrischen (41) und unsymmetrischen (40) Korrektoreingänge. Neben dem Signaleingang und Ausgang, enthält das veränderbare nichtlineare "Zweitor" noch eine Steuerleitung (42) mit der die Umschalter geschaltet und verschiedene Arbeitspunkte in den Kennlinien angewählt werden können. Für sehr kleine Eingangssignale am EntzerrerWandler-System werden im untersten Arbeitspunkt die Koeffizienten der linearen (49) und quadratischen (50) Glieder optimiert. Die Ordnung des Taylorreihenansatzes bzw. die Anzahl der parallelen Zweige in dem gedächtnis-

losen, nichtlinearen Zweitor bestimmt die Anzahl weiterer Arbeitspunkte. Sie werden in zweckmäßigen Abstand über den weiteren Aussteuerungsbereich des Wandlers verteilt.

Das Generierungsteil (75) besteht aus zwei Signalgeneratoren (65, 66), die einen sinusförmigen Ton in der Nähe der Resonanzfrequenz und einen zweiten höherfrequenten Ton erzeugen. Beide Signale werden in einer Addierstufe (67) addiert und über einen spannungsgesteuerten Verstärker (91) an das Entzerrernetzwerk (1) über den Umschalter (87) ausgegeben. Das Hauptsteuerwerk (89) stellt diese Verbindung über das Relais (88) während des Anpaßvorganges her und schaltet nach erfolgter Anpassung wieder auf den normalen Signaleingang (93) zurück. Das Entzerrernetzwerk (1) ist über einen gleichspannungsübertragenden Verstärker (7) mit dem Wandler (2) verbunden.

Über ein Mikrofon (3) wird während des Anpaßvorganges der Schalldruck in der Nähe des Lautsprechers gemessen und das elektrische Mikrofonsignal dem Analyseteil (76) zugeführt. Das Analyseteil enthält für jeden anzupassenden Parameter einen Korrelator, der mit Hilfe eines Multiplizierers (77, 78, 79, 80) und eines nachgeschalteten Tießpasses (81, 82, 83, 84) realisiert wurde. Auf den einen Eingang des Korrelators wird das Mikrofonsignal, auf den anderen Eingang ein aus dem Anregungssignal abgeleitetes Referenzsignal geführt. Die Amplitude der Referenzsignale ist willkürlich und trägt keinen Informationswert. Die Frequenz und Phasenlage der Referenzsignale stimmt jedoch mit den Grundtönen, Harmonischen bzw. Intermodulationen im Mikrofonsignal überein. Das Referenzsignal $R(f_1)$ und $R(f_2)$ an den Multiplizierern (77, 78) wird durch lineare Filterung (68, 89) mit der Übertragungsfunktion $X(s)$ des linearen Zweitors der Entzerrerschaltung aus dem Anregungssignale gewonnen.

Das Referenzsignale $R(f_1)$ wird im Korrelator (77, 81) mit dem Mikrofonsignal verknüpft, anschließend über ein Differenzglied (85) an den Steuereingang (39) des gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitors der Steifigkeitskompensation geführt. In gleicher Weise wird das Referenzsignal $R(f_2)$ dem Korrelator (78, 82) zugeführt und dessen Ausgang über ein Differenzglied (86) mit dem Steuereingang (39) der Dämpfungskompensation verbunden. Durch beide Steuersignale wird der konstante Anteile der gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitore N_S und N_D so verändert, daß das lineare Übertragungsverhalten (Resonanzfrequenz und Güte) des Entzerrernetzwerk-Wandler-Systems mit dem Übertragungsverhalten $X(s)$ übereinstimmt und das Ausgangssignal an den Integratoren (81) und (82) maximal wird.

Die Referenzsignale $R(f_1 + f_2)$ und $R(2 \cdot f_1 + f_2)$ werden in einer elektronischen Nachbildung des nichtlinearen Wandlers synthetisch erzeugt. Dieses Netzwerk ist eine schaltungstechnische Umsetzung der Modellierung des Übertragungsverhaltens mit der VOLTERRA-Reihe.

Zunächst werden die Signale f_1 und f_2 über lineare Filter X (68, 89) geführt, in (72) miteinander multipliziert und mit der linearen Übertragungsfunktion des Wandlers (74) nochmals gefiltert. Das so erhaltene Referenzsignal $R(f_1 + f_2)$ entspricht in Phase und Frequenz den Intermodulationen die durch Unsymmetrien in der Kennlinie des elektrodynamischen Kopplungsfaktors erzeugt werden ([6] Klippel, W.: Dynamical Measurement of Non-Linear Parameters of Electrodynamical Loudspeakers and their Interpretation. 88. Conv. of the Audio Eng. Soc., März 1990, preprint 2903). Zur Bildung des Referenzsignales $R(2 \cdot f_1 + f_2)$ wird das Signal f_1 vor der Multiplikation zusätzlich quadriert. Das Ausgangssignal des Multiplizierers (71) wird ebenfalls einer linearen Filterung (74) mit der Übertragungsfunktion X unterzogen.

Das Referenzsignale $R(f_1 + f_2)$ wird im Korrelator (79, 83) mit dem Mikrofonsignal verknüpft, anschließend dem unsymmetrischen Steuereingang (40) des gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitors der Antriebskompensation N_B zugeführt. In gleicher Weise wird das Referenzsignal $R(2 \cdot f_1 + f_2)$ dem Korrelator (80, 84) zugeführt und dessen Ausgangssignal mit dem symmetrischen Steuereingang (41) der gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitors N_B der Antriebskompensation verbunden. Durch beide Steuersignale wird die Kennlinie so verändert, daß die Intermodulationsprodukte zweiter und dritter Ordnung im empfangenen Meßsignal reduziert und das Ausgangssignal der Integratoren (83) und (84) gegen Null läuft. Das Vorzeichen des Korrelationssignals zeigt eine Über- bzw. Unterkompensation durch das Entzerrernetzwerk an und führt zu einer Senkung bzw. Erhöhung der Spannung in den nachfolgenden Halteschaltungen (48, 49, 50, 51, 52) der gedächtnislosen Nichtlinearität. Nachdem die einzelnen Baugruppen des Anpaßsystems beschrieben wurden, abschließend noch eine funktionelle Darstellung des Gesamtsystems. Mit dem Start des Anpassungsvorganges verbindet das Hauptsteuersystem (89) den Entzerrereingang (31) mit dem Generierungsteil (75), schaltet die niedrigste Anregungsspannung über den spannungsgesteuerten Verstärker (91) ein und startet die Anpassung der Konstanten der Zweitor N_D , N_S und bestimmt den optimalen Spannungswert in der Halteschaltung (48). Gleichzeitig werden im Zweitor N_B die Koeffizienten der linearen und quadratischen Zweige verändert und optimale Spannungen in den Halteschaltungen (49, 50) bestimmt. Ist das System eingeschwungen, schaltet das Hauptsteuersystem (89) die zwei höheren Koeffizienten der Taylorentwicklung in N_B mit den Umschaltern (44, 45) ein, erhöht die Anregungsspannung und bestimmt die Optimalwert für die Halteschaltungen (51, 52). Die konstanten Parameter im Zweitor N_S und N_D , d.h. die Werte in den Halteschaltungen (48) werden jedoch nicht mehr verändert. Sind die Arbeitspunkte durchlaufen, dann

schaltet das Hauptsteuersystem das Generierungsteil (75) ab und verbindet den Entzerrereingang (31) mit dem allgemeinen Signaleingang (93).

Die mit der Erfindung erzielten Vorteile bestehen insbesondere darin, einfache Entzerrernetzwerke zu realisieren, die die wandlertypischen Besonderheiten weitestgehend berücksichtigen und eine minimale Anzahl von Bauelementen erfordern. Das Problem der Anpassung des Entzerrernetzwerkes an den Wandler wurde mit Hilfe einer weiteren Schaltungsanordnung gelöst. Das zeitweise aktivierte Anpaßsystem erlaubt eine selbständige Bestimmung und Einstellung der optimalen Entzerrerparameter. Dadurch kann mit dem an den Wandler angekoppelten Entzerrernetzwerk sowohl eine gewünschte Veränderung der linearen Eigenschaften als auch eine Reduzierung der nichtlinearen Verzerrungen über den gesamten Aussteuerungsbereich des Wandlers erzielt werden.

	x	....	Schwingspulenauslenkung,
	v	....	Schnelle der Schwingspule,
15	u(t)	....	unverzerrtes Spannungssignal,
	u_L(t)	....	Spannung an den Eingangsklemmen des
			Wandlers,
20	i(t)	....	unverzerrtes Stromsignal,

25

30

35

40

45

50

55

	$i_L(t)$	....	Wandlereingangsstrom,
	m	....	schwingende Masse
5	z_M	....	(Schwingspule, Membran, Luft),
	R_e	....	mechanischer Reibungsstandwert,
	$L(x)$	....	elektrischer Schwingspulenwiderstand,
			Induktivität,
10	$s_T(x) = \frac{1}{n_T(x)}$		Treibersteifigkeit,
15	$s_B(x) = \frac{1}{n_B(x)}$		Luftsteifigkeit des Boxvolumens,
	$s_G(x) = \frac{1}{n(x)}$		auslenkungsabhängiger Anteil der Gesamt-
			steifigkeit,
20	$s_O = \frac{1}{n_O}$		konstanter Anteil der Gesamtsteifigkeit,
	m_L	....	bewegte Luftmasse im Baßreflexloch,
25	z_L	....	Reibungsstandwert der Verluste im Baßre-
			flexsystem,
	$F_{mag}(i,x)$	...	elektromagnetische Antriebskraft,
30	$\underline{X}(s)$		lineare Ausschlagsübertragungsfunktion,
	$\underline{J}(s)$		laplacetransformierter linearer Teil der
			Differentialgleichung,
	$\underline{W}_1(s)$	....	elektrischer Wandlereingangswiderstand,
35	R_1	....	Realteil von \underline{W}_1 ,
	K	....	Wandlerkonstante,
	F	....	mechanische Antriebskraft,
	n_M	....	Nachgiebigkeit der Membranaufhängung,
40	S_M	....	Membranfläche,
	Z_{Box}	....	Reibung im Boxdämpfungsmaterial,
	N_{Box}	....	Nachgiebigkeit des Boxvolumens,
45	$N_D(p_D)$	....	Nachgiebigkeit der Druckkammer,
	Z_K	....	Reibung im Kanal,
	Z_H	....	Hornimpedanz,
	q_k	....	Schallfluß im Kanal,
50	p_D	....	Schalldruck in der Druckkammer,

	p_o	....	statischer Luftdruck,
	κ	....	Adiabatenkoeffizient (1.4),
5	V	....	Volumen der Druckkammer,
	$\underline{W}_2(s)$	....	äquivalente elektr. Summenimpedanz des mech. Schwingungssystemes,
	$N_D(i_D)$	....	äquivalente elektr. Druckkammersteifigkeit,
10	Z_K	....	elektr. Widerstand äquivalent der Reibung im Überströmkanal,
	$\underline{Z}_H(s)$	....	äquivalente Hornimpedanz,
15	Z_o	....	Eingangsimpedanz für unendlich langes Rohr (ebene Schallwelle),
	$i_D(t)$	....	Strom äquivalent dem Schalldruck in der Druckkammer,
20	$i_{Dn}(t)$	....	nichtlinearer Stromanteil von $i_D(t)$,
	$i_{Dl}(t)$	....	linearer Stromanteil von $i_D(t)$,
	$u_K(t)$	....	Spannung äquivalent dem Schallfluß im Kanal,
25	s	....	Laplaceoperator,
	$L^{-1}\{ \}$	....	inverse Laplacetransformation,
	R_o	....	konstanter Teil der Strömungsimpedanz,
30	$R(u_K)$	....	abhängiger Teil der Strömungsimpedanz,
	$\underline{Z}(s)$	....	konstante Summenimpedanz (Horn, Kanal),
	N_o	....	konstanter Teil der Druckkammernachgiebigkeit,
35	$N(i_D)$	....	abhängiger Teil der Nachgiebigkeit,
	$\underline{I}(s)$	....	lineare Spannungs/Stromübertragungs- funktion,
	$\underline{W}(s)$	....	Summenimpedanz des elektro-mechanischen
40	$\underline{Y}(s)$	....	Übertragungsfunktion des linearen Systems zur Erzeugung von u_K ,
	$z_m(x)$	....	auslenkungsabhängiger Anteil der mechanischen Reibung,
45	z_o	....	konstanter Anteil der mechanischen Reibung,
	m_B	....	bewegte Luftmasse in der
50			Druckausgleichsbohrung,
	z_B	....	Verluste im akustischem System,

	p_M	....	Schalldruck,
	F	....	Antriebskraft an der Membran,
	Z	....	Zweitor, rückwirkungsfreies Übertragungs-
5			glied mit einem Eingang und einem Ausgang,
	Z_{SS}	....	nichtlineares, dynamisches Zweitor zur
			Begrenzung der max. Auslenkung und der
			max. Verlustleistung,
10	X	....	Zweitor mit der Übertragungsfunktion $\underline{X}(s)$,
	I	....	Zweitor mit der Übertragungsfunktion $\underline{I}(s)$,
	Y	....	Zweitor mit der Übertragungsfunktion $\underline{Y}(s)$,
15	F	....	Zweitor mit der Übertragungsfunktion $\underline{F}(s)$,
	P	....	Zweitor mit der Übertragungsfunktion $\underline{P}(s)$,
	Q	....	Zweitor mit der Übertragungsfunktion $\underline{Q}(s)$,
	W	....	Zweitor mit der Übertragungsfunktion $\underline{W}(s)$,
20	O	....	lineares, dynamisches Zweitor,
	B	....	lineares, dynamisches Zweitor,
	D	....	Dreitor, rückwirkungsfreies Übertragungs-
			glied mit zwei Eingängen und einem Ausgang,
25	E_1	....	Eingang E_1 des Dreitors,
	E_2	....	Eingang E_2 des Dreitors,
	A	....	Ausgang des Dreitors,
30	D_L	....	Dreitor zur Induktivitätsentzerrung,
	D_{MI}	....	Dreitor zur Entzerrung des elektromagn.
			Antriebes bei Stromspeisung des
			Schallsenders,
35	D_{MU}	....	Dreitor zur Entzerrung des elektromagn.
			Antriebes bei Spannungsspeisung des
			Schallsenders,
40	D_B	....	Dreitor zur Entzerrung des elektrodyn.
			Antriebes
	D_D	....	Dreitor zur Dämpfungsentzerrung,
	D_S	....	Dreitor zur Steifigkeitsentzerrung,
45	D_A	....	Dreitor zur Kompensation der
			adiabatischen Kompression,
	D_R	....	Dreitor zur Kompensation der
			turbulenten Strömung,
50	D_{BE}	....	Dreitor zur Entzerrung des elektrodyn.

Antriebes

	D_{DE}	....	Dreitor zur Dämpfungsentzerrung,
5	D_{SE}	....	Dreitor zur Steifigkeitsentzerrung,
	D_{SS}	....	Dreitor zur Begrenzung der max.
			Verlustleistung bzw. Auslenkung,
10	N_B	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Übertragungs- glied der elektrodyn. Antriebs- entzerrung,
	N_D	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Über- tragungs- glied der Dämpfungsentzerrung,
15	N_S	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Über- tragungs- glied der Steifigkeitsentzerrung,
20	N_L	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Über- tragungs- glied der Induktivitätsentzerrung,
	N_A	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Über- tragungs- glied der adiabatischen Kompression,
25	N_R	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Über- tragungs- glied der turbulenten Strömung,
	N_M	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Über- tragungs- glied der elektromagn. Antriebs- entzerrung,
30	N_{BE}	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Über- tragungs- glied der elektrodyn. Koppelpara- meterentzerrung eines Schallempfängers,
35	N_{DE}	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Über- tragungs- glied der Dämpfungsentzerrung,
40	N_{SE}	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Über- tragungs- glied der Induktivitätsentzerrung,
	N_O	....	frequenzunabhängiges nichtlineares Über- tragungs- glied der Schutzschaltung,
45			

Patentansprüche

50 1. Schaltungsanordnung zur Korrektur des linearen und nichtlinearen Übertragungsverhaltens elektroakustischer Wandler im gesamten Aussteuerungsbereich (Klein- und Großsignalbereich), bestehend aus einem elektroakustischen Wandler und einem, an den Anschlußklemmen angeschlossenen, elektrischen Entzerrernetzwerk,

55 dadurch gekennzeichnet,

daß das elektrische Entzerrernetzwerk (1) aus einer Kettenschaltung (Hintereinanderschaltung) von Zweitoren (Übertragungsglieder Z_1, Z_2, \dots, Z_n) besteht, wobei wenigstens ein Zweitor (Z_i) zwischen

seinem Eingangs- und Ausgangstor ein nichtlineares, gedächtnisloses (frequenzunabhängiges, statisches) oder nichtlineares, dynamisches Übertragungsverhalten aufweist und daß das lineare und nichtlineare Übertragungsverhalten dieser Zweitore mit Hilfe einer Anpaßanordnung, die zeitweilig oder ständig an den Wandler (2, 3) und/oder das Entzerrernetzwerk (1) angeschlossen ist, an den Wandler (2, 3) automatisch angleichbar ist.

2. Anordnung nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet,

daß das nichtlineare Zweitor (Z) mindestens ein Dreitor D_i enthält, welches aus einem nichtlinearen, dynamischen Übertragungsglied (23) (Zweitor U) und einem gedächtnislosen Verknüpfungselement V (24) (z. B. Addierer, Multiplizierer, usw.) besteht, daß die beiden Eingangssignale des Verknüpfungselementes (24) über eine algebraische Operation (z. B. Multiplikation oder Addition) zum Ausgangssignal (25) verknüpft werden, wobei der eine Eingang (21) (E_1) des Dreitors (D) direkt mit dem einen Eingang des Verknüpfungselementes (24) (V) verbunden ist und der andere Eingang (22) (E_2) des Dreitors (D) über das Zweitor (23) (U) mit dem zweiten Eingang des Verknüpfungselementes (24) (V) zusammengeschaltet ist und der Ausgang des Verknüpfungselementes (24) mit dem Ausgang des Dreitors (D) verbunden ist und daß das Zweitor (23) (U) aus dynamischen, linearen Zweitoren und/oder gedächtnislosen, nichtlinearen Zweitoren und/oder Verknüpfungselementen besteht.

3. Anordnung nach Anspruch 2,

dadurch gekennzeichnet,

daß bei Verwendung eines Dreitors (D) im Zweitor (Z) der Eingang (21) (E_1) des Dreitors (D) mit dem Eingang (11) des Zweitores (Z) und der Ausgang (25) (A) des Dreitors (D) mit dem Ausgang (12) des Zweitores (Z) verbunden ist und daß das verbleibende Eingangstor (22) (E_2) des Dreitors (D) mit dem Eingangstor (11) des Zweitores (Z) oder mit dem Ausgangstor (12) des Zweitores (Z) verbunden ist

oder

daß bei Verwendung mehrerer Dreitore (D_1, \dots, D_i) im Zweitor (Z) das Eingangstor (21) (E_1) des ersten Eingangstores (D_1) mit dem Eingang (11) des Zweitores (Z), das Ausgangstor (25) des ersten Dreitors (D_1) mit dem Eingang (21) (E_1) des nachfolgenden zweiten Dreitors (D_2) verbunden ist und daß mögliche weitere Dreitore (D_3, \dots, D_i) in gleicher Weise miteinander verbunden sind, so daß alle vorhandenen Dreitore (D_1, \dots, D_i) in einer Kettenschaltung angeordnet sind und daß das Ausgangstor (25) (A) des letzten Dreitors (D_i) mit dem Ausgangstor (12) des Zweitores (Z) verbunden ist und daß die verbleibenden Eingangstore (22) (E_2) aller enthaltenen Dreitore mit dem Eingangstor (11) des Zweitores (Z) oder mit dem Ausgangstor (12) des Zweitores (Z) verbunden sind.

4. Anordnung nach Anspruch 2,

dadurch gekennzeichnet,

daß der Eingang (22) (E_2) des Dreitors (D) über ein lineares, dynamisches Übertragungsglied (Filter mit Tiefpaßcharakteristik) und über ein nichtlineares, gedächtnisloses Übertragungsglied (Zweitor N) seriell mit dem einen Eingang eines Verknüpfungselementes (V) verbunden ist und der zweite Eingang des Verknüpfungselementes mit dem Eingang (21) (E_1) des Dreitors (D) und der Ausgang des Verknüpfungselementes (V) mit dem Ausgang (25) (A) des Dreitors (D) zusammengeschaltet sind, wobei das Verknüpfungselement im Falle der Kompensation des auslenkungsabhängigen Kraftfaktors ein Multiplizierer und in allen anderen Fällen ein Addierer ist.

5. Anordnung nach Anspruch 2,

dadurch gekennzeichnet,

daß der Eingang (22) (E_2) des Dreitors (D) mit einem linearen, dynamischen Übertragungsglied (Filter

mit Tiefpaßcharakteristik) verbunden ist, der Ausgang dieses linearen Filters sowohl über ein lineares, dynamisches Übertragungsglied (108) (Differenzierglied) mit dem einen Eingang eines Multiplizierers als auch über ein gedächtnisloses, nichtlineares Übertragungsglied (Zweiter N) mit dem anderen Eingang des Multiplizierers verbunden ist, der Ausgang des Multiplizierers mit einem Eingang eines Addierers, der zweite Eingang des Addierers mit dem Eingang (21) (E_1) des Dreitors und der Ausgang des Addierers mit dem Ausgang (25) (A) des Dreitors (D) zusammengeschaltet sind.

6. Anordnung nach Anspruch 2,

dadurch gekennzeichnet,

daß der Eingang (22) (E_2) eines Dreitors (D) sowohl mit dem Eingang eines linearen, dynamischen Übertragungsgliedes (100) (Filter mit Tiefpaßcharakteristik) als auch im Falle der Stromspeisung des elektrodynamischen Schallsenders direkt mit dem Eingang eines Quadrierers (168) verbunden ist und im Falle der Spannungsspeisung ein zusätzliches dynamisches, nichtlineares Übertragungsglied (111) zwischen Eingang (22) (E_2) des Dreitors (D) und dem Eingang des Quadrierers (168) geschaltet ist, der Ausgang des Quadrierers (168) mit dem Eingang eines Multiplizierers (109) und der Ausgang des linearen Übertragungsgliedes (100) über ein nachgeschaltetes gedächtnisloses, nichtlineares Übertragungsglied (110) (N) seriell mit dem anderen Eingang des Multiplizierers (169) verbunden ist, der Ausgang des Multiplizierers (169) mit dem ersten Eingang eines Addierers (103), der zweite Eingang des Addierers (103) mit dem Eingang (21) (E_1) des Dreitors (D) und der Ausgang des Addierers (103) mit dem Ausgang (25) (A) des Dreitors (D) zusammengeschaltet sind.

7. Anordnung nach Anspruch 2,

dadurch gekennzeichnet,

daß der Eingang (22) (E_2) eines Dreitors (D) sowohl mit dem Eingang eines linearen, dynamischen Übertragungsgliedes (Filter mit Tiefpaßcharakteristik) als auch im Falle der Entzerrung eines elektrodynamischen Mikrofons direkt mit dem Eingang eines Multiplizierers verbunden ist und im Falle der Entzerrung eines elektrodynamischen Lautsprechers über ein zusätzliches dynamisches, nichtlineares Übertragungsglied mit dem Eingang des Multiplizierers verbunden ist, der Ausgang des linearen, dynamischen Übertragungsgliedes über ein nachgeschaltetes gedächtnisloses, nichtlineares Übertragungsglied (N) seriell mit dem anderen Eingang des Multiplizierers verbunden ist, der Ausgang des Multiplizierers über ein weiteres lineares, dynamisches Übertragungsglied, das im Falle der Entzerrung eines elektrodynamischen Lautsprechers ein Differenzierer ist, mit dem ersten Eingang eines Addierers (103), der zweite Eingang des Addierers (103) mit dem Eingang (21) (E_1) und der Ausgang des Addierers (103) mit dem Ausgang (25) (A) des Dreitors (D) zusammengeschaltet sind.

8. Anordnung nach Anspruch 2,

dadurch gekennzeichnet,

daß der Eingang (22) (E_2) eines Dreitors (D) über ein dynamisches Übertragungsglied, über ein nachgeschaltetes gedächtnisloses, nichtlineares Übertragungsglied (N) und über ein nachgeschaltetes, weiteres, lineares und dynamisches Übertragungsglied seriell mit einem einen Eingang eines Addierers (103) verbunden ist und der zweite Eingang des Addierers (103) mit dem Eingang (21) (E_1) des Dreitors (D) und der Ausgang des Addierers (103) mit dem Ausgang (25) (A) des Dreitors (D) zusammengeschaltet sind.

9. Anordnung nach einem oder mehreren der Ansprüche 3 bis 8,

dadurch gekennzeichnet,

daß beim elektrodynamischen Schallsender das Dreitor (D_B) zur Kompensation des elektrodynamischen Antriebes mit den anderen Dreitoren derart in Kette geschaltet ist, daß das Dreitor (D_L) zur Kompensation der Induktivitätskompensation an den Ausgang des Dreitors (D_B) und alle anderen Dreitore eingangsseitig an das Dreitor (D_B) angeschlossen sind.

10. Anordnung nach einem oder mehreren der Ansprüche 3 bis 8,

dadurch gekennzeichnet,

5 daß zur gleichzeitigen Kompensation des auslenkungsabhängigen, elektrodynamischen Koppelparameters und weiterer Wandlerparameter des elektrodynamischen Schallempfängers das Dreitor (D_{BE}) zur Kompensation des Kopplungsparameters an den Ausgang des Mikrofons (3) oder eines unmittelbar nachgeschalteten Mikrofonverstärkers (7) geschaltet ist und daß der Ausgang des Dreitors (D_{BE}) seriell mit einem weiteren nichtlinearen dynamischen Zweitor verbunden ist, welches die Kompensationsdreitor
10 tore für die weiteren Wandlerparameter enthält.

11. Anordnung nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet,

15 daß die Anpaßordnung aus einem Generierungsteil zur Erzeugung eines Anregungssignales und aus einem Analyseteil zur Erfassung und Auswertung eines Meßsignales besteht, das Generierungsteil mit dem Wandler und/oder mit dem nichtlinearen Entzerrernetzwerk und dem Analyseteil zu einer Meßkette verbunden ist, ein elektrisches oder mechanisches oder akustisches Signal am Wandler durch das
20 Analyseteil gemessen wird, der Ausgang des Analyseteils mit dem Steuereingang des Entzerrernetzwerkes verbunden ist und die übertragenen Steuersignale die Parameter der linearen und nichtlinearen Übertragungsglieder des Entzerrernetzwerkes verändern und an den Wandler automatisch anpassen.

25

30

35

40

45

50

55

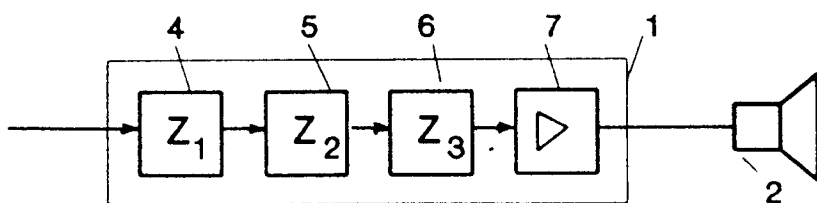


Fig. 1 a

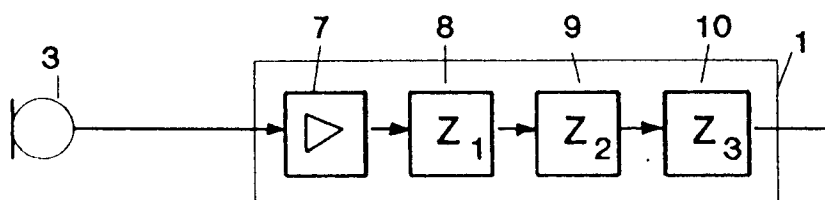


Fig. 1 b

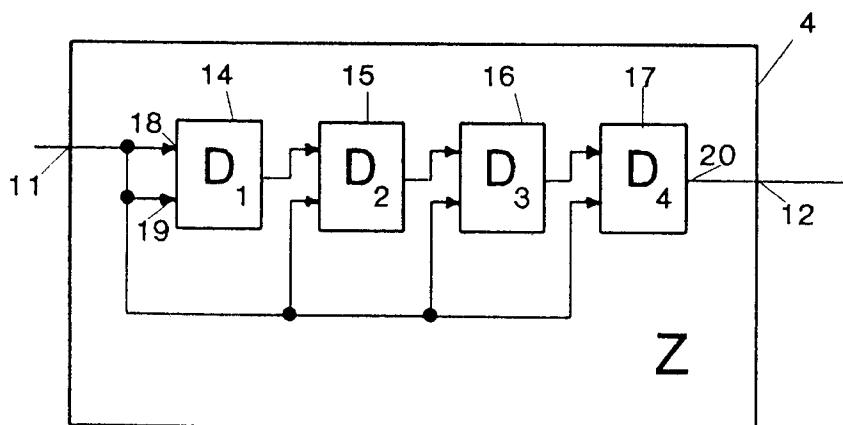


Fig. 2 a

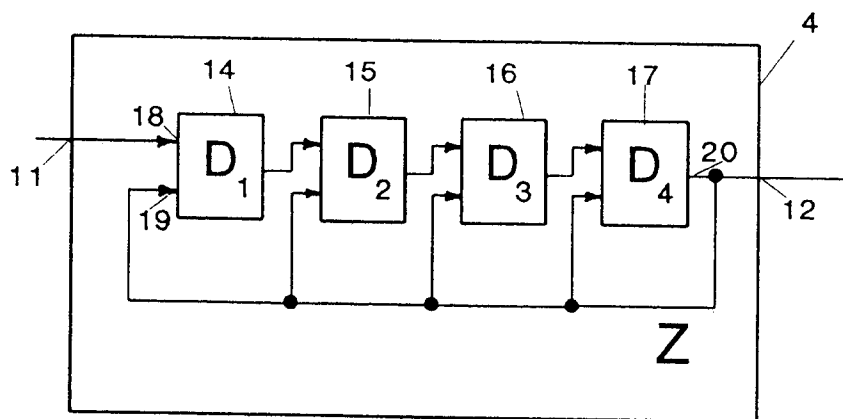


Fig. 2 b

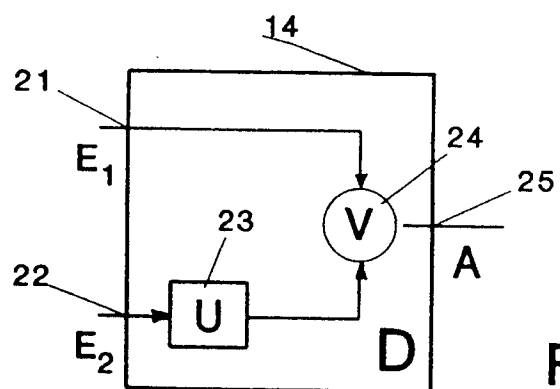


Fig. 3

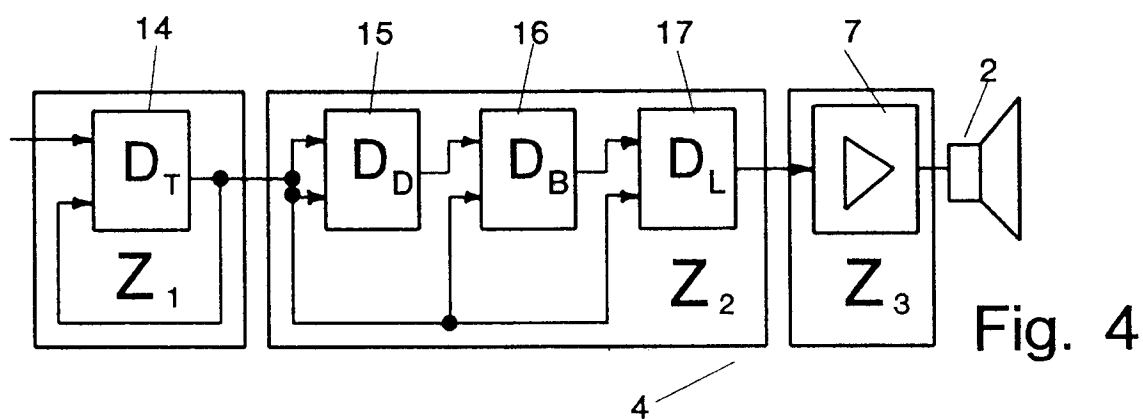


Fig. 4

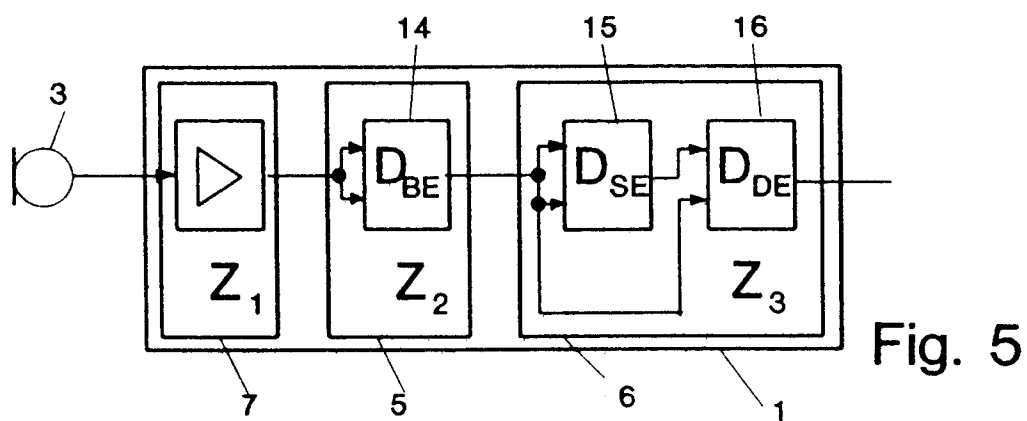


Fig. 5

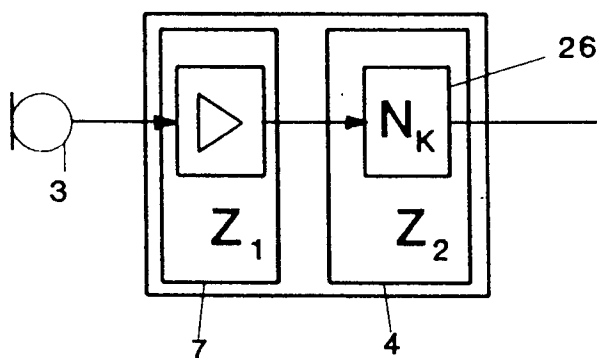


Fig. 6

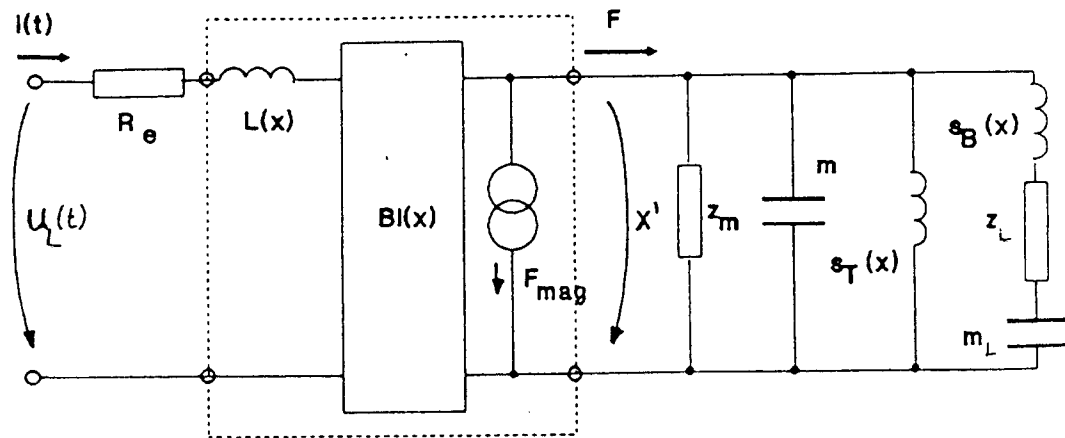


Fig. 7 a

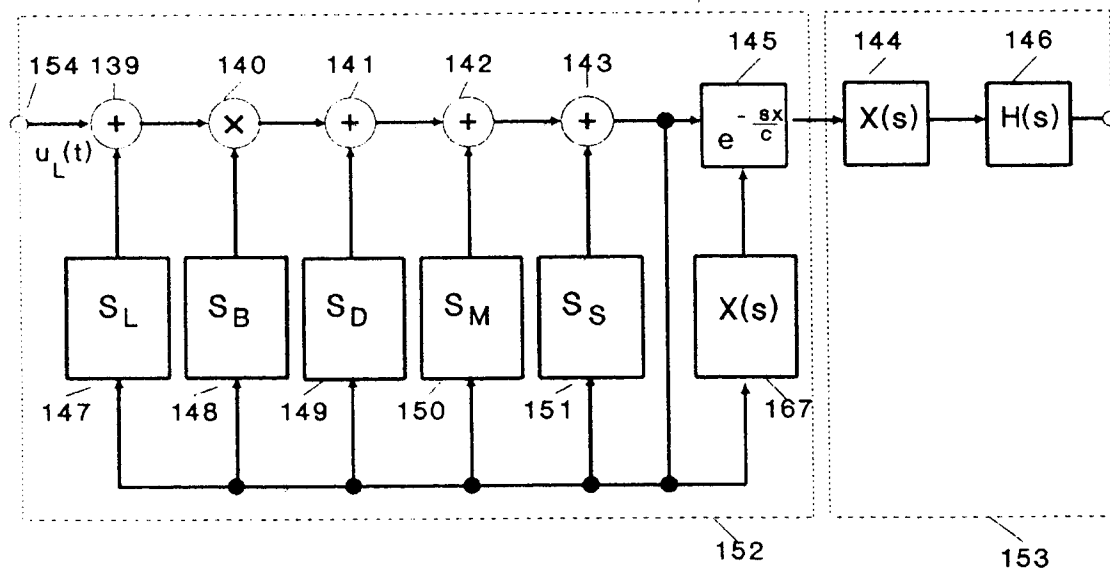
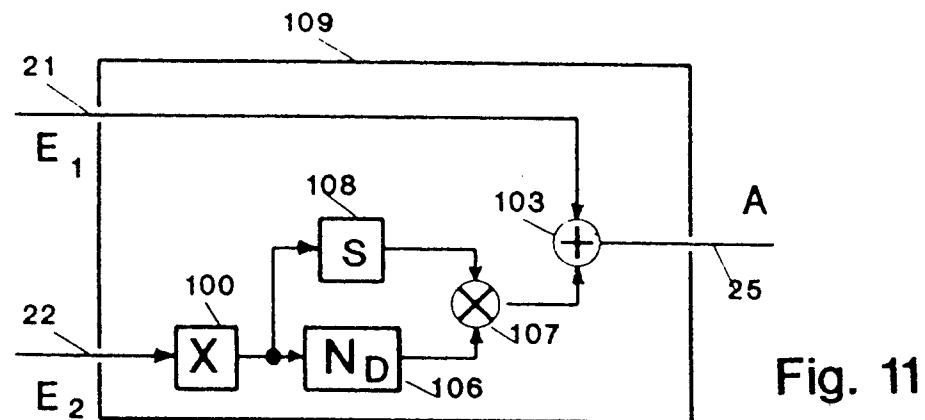
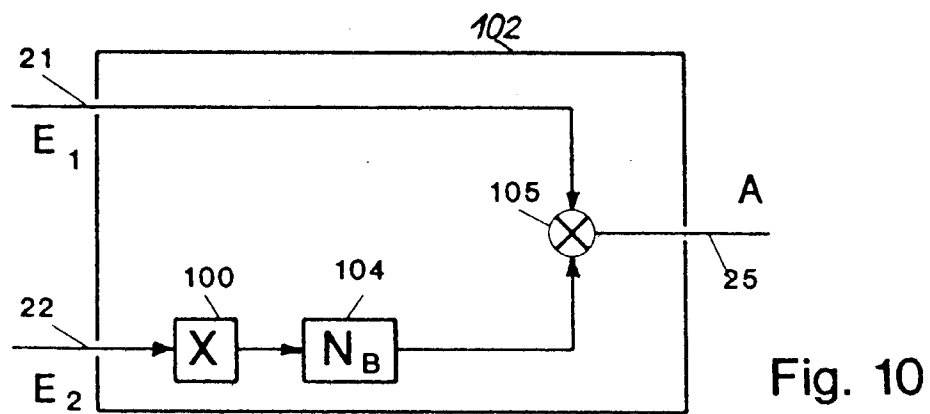
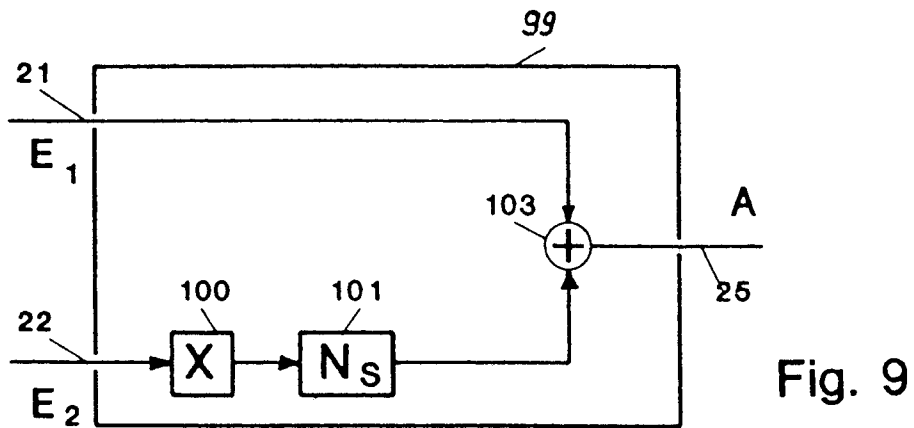
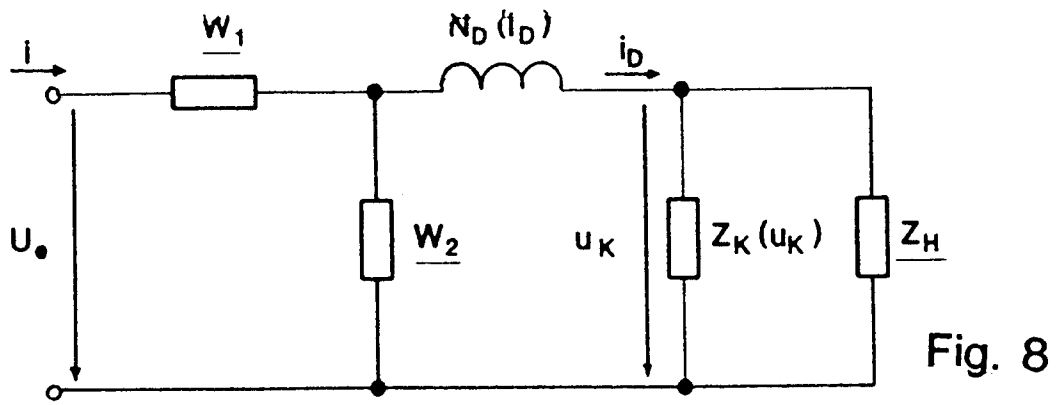


Fig. 7 b



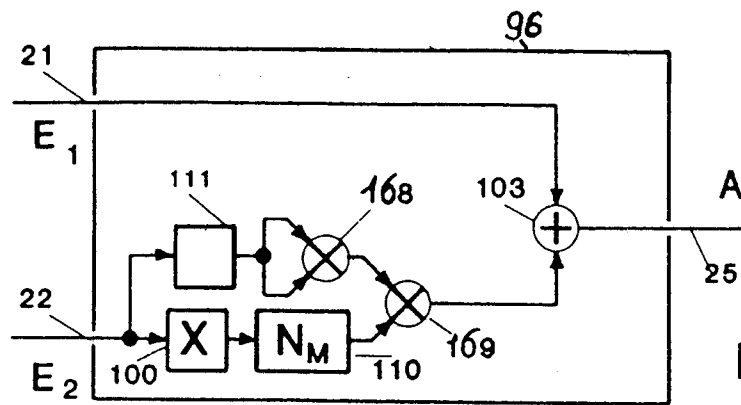


Fig. 12

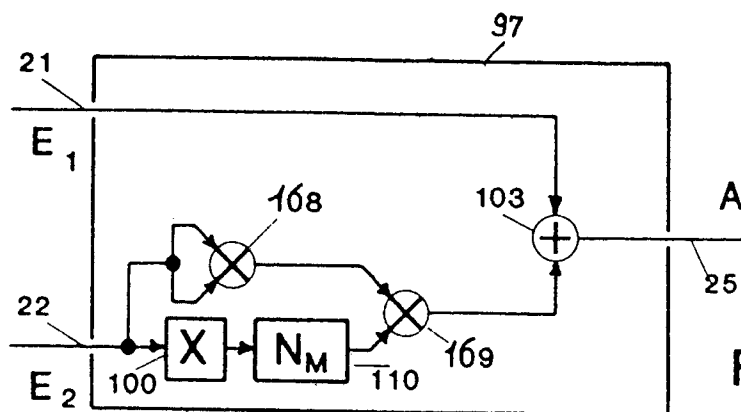


Fig. 13

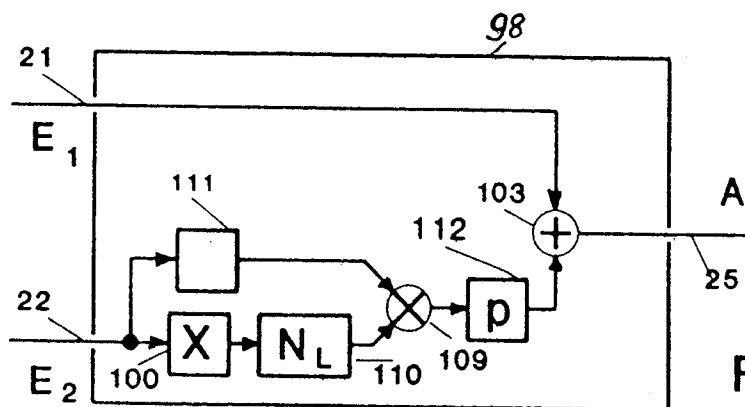


Fig. 14

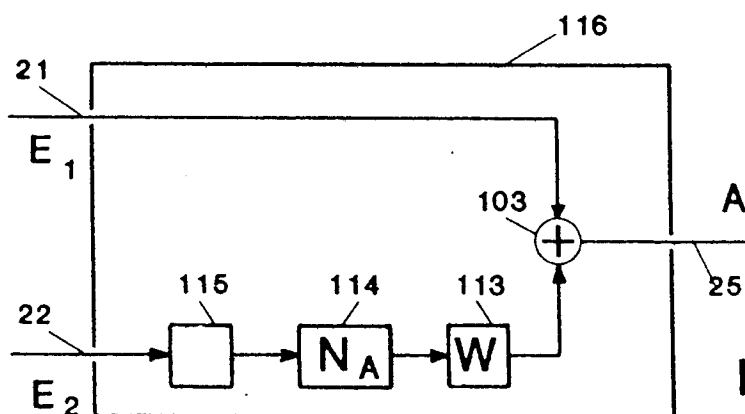


Fig. 15

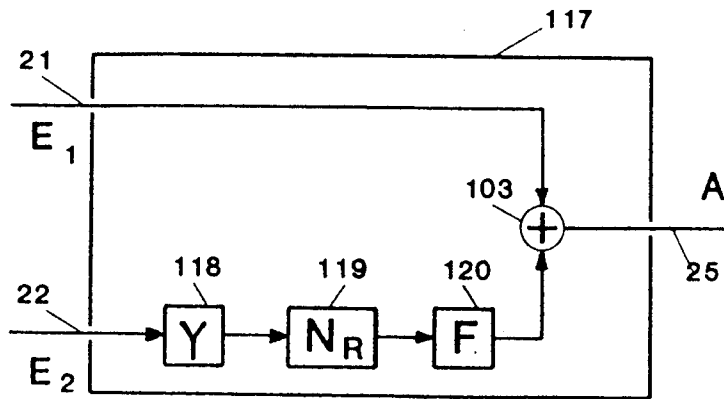


Fig. 16

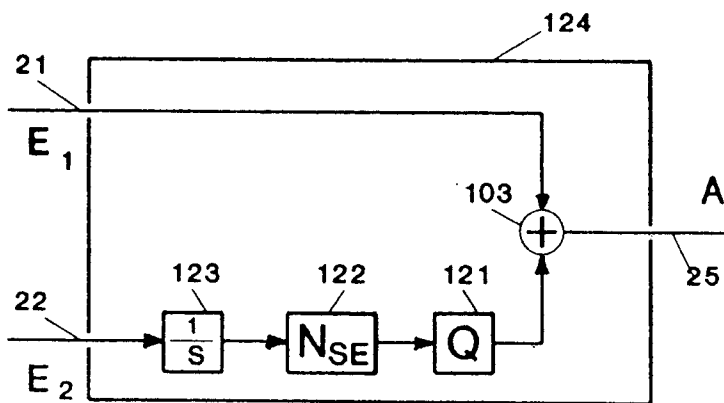


Fig. 17

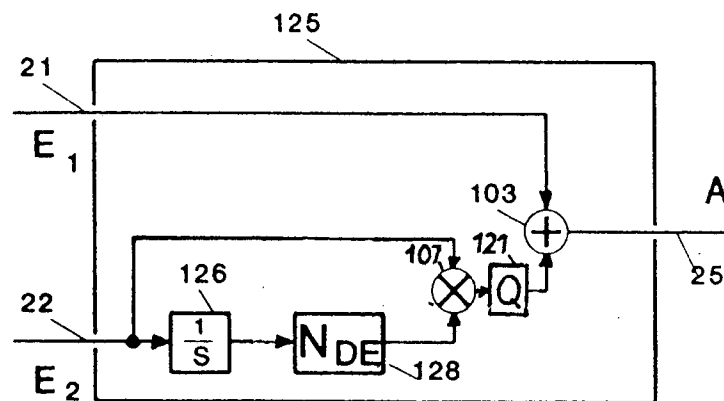


Fig. 18

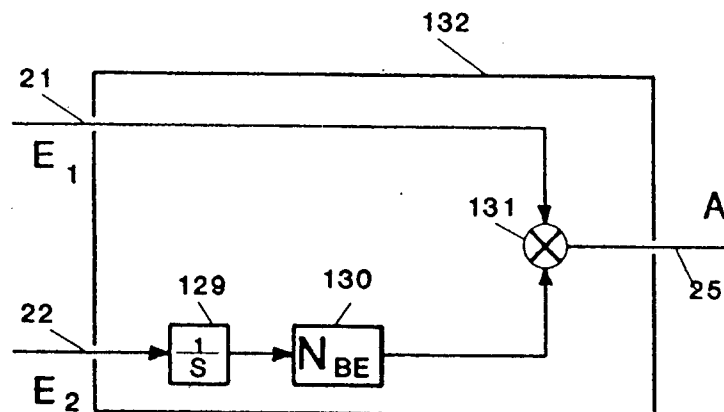


Fig. 19

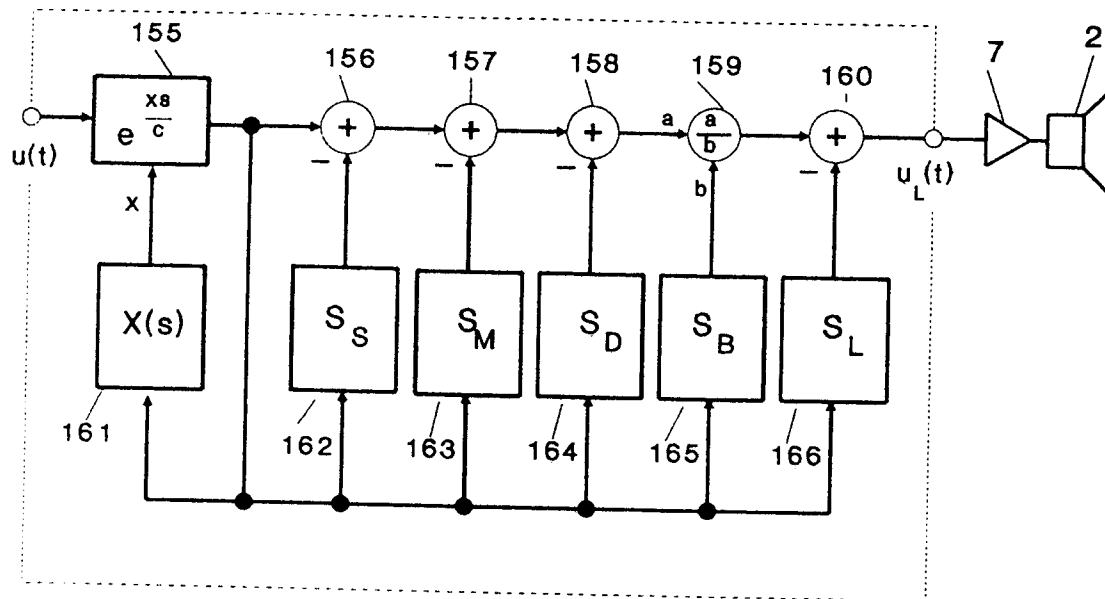


Fig. 20 a

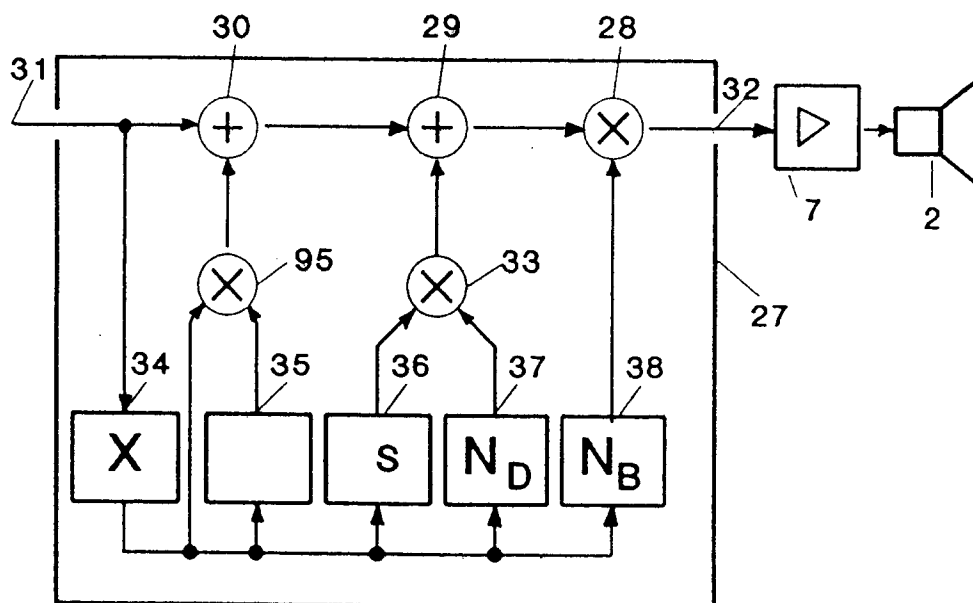


Fig 20 b

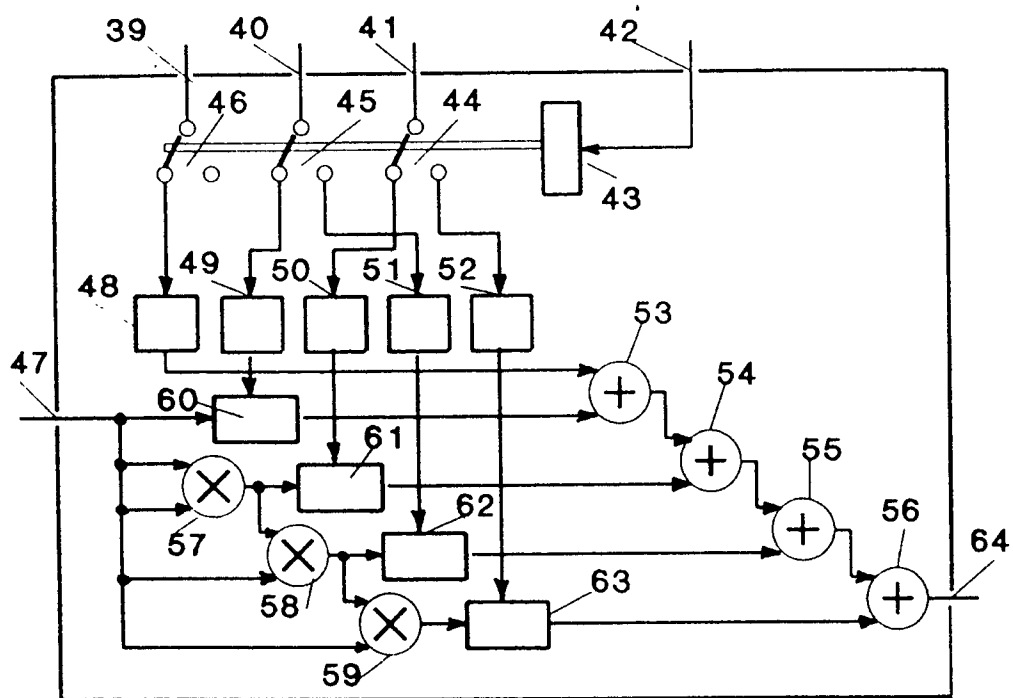


Fig. 21

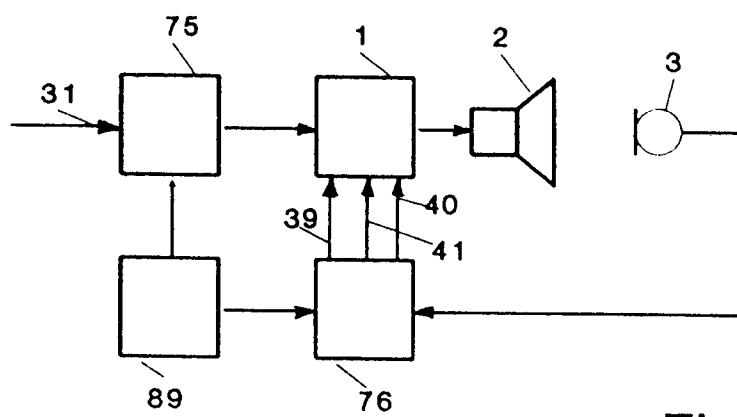


Fig. 22

