

Gegengekoppelte Lautsprecher

dargestellt am Beispiel des Modells „Monitor 5“

Das Prinzip des geregelten Lautsprechers ist zwar seit einem halben Jahrhundert bekannt, jedoch scheiterte seine Realisierung bis vor kurzem unter anderem an technologischen Schwierigkeiten. Vielleicht fehlte auch — zu vorkommend formuliert — die „Gunst der Stunde“ oder der spezifische „Musenkuß“; vielleicht auch die Möglichkeit, eine Idee lange und intensiv genug zu verfolgen, ohne Rücksicht auf kommerzielle Prioritäten.

Erste, auch kommerziell tragfähige Ansätze eines gegengekoppelten Lautsprechers sind beim Philips-„RH 532 Electronic MFB“ zu finden, der auf der Internationalen Funkausstellung Berlin '73 vorgestellt wurde. Das in diesem Aktivlautsprecher (aktiv getrennt sind Tieftonkanal einerseits und der Mittel/Hochtongkanal andererseits) realisierte Konzept der teilweisen Ausregelung des Tieftonchassis ist auch bei der „Jamo-„MFB 90“ zu finden, die allerdings eine Dreiweg-Aktivbox ist. Die klanglichen Eigenschaften und Vorzüge des MFB-Tieftöners von Philips sind inzwischen auch durch neutrale Hörvergleiche belegt.

Einem anderen Weg der Gegengekopplung beschreitet die Saarbrücker Firma Backes und Müller bei ihrem Monitor 5. Während das MFB-Konzept, verkürzt ausgedrückt, nur einen kleinen Teil der Tieftonmembran ausregelt und als Ist-Wert-Aufnehmer ein massebehaftetes Piezoelement benutzt, handelt es sich beim Monitor 5 um eine kapazitive, also masselose Abtastung, die darüber hinaus nicht nur einen Teil einer Membran erfaßt, sondern die gesamte Membran, und zwar bei allen vier Tieftönern, dem Mitteltöner und dem Hochtöner. Insofern ist das Konzept des Backes- und Müller-Monitors umfassender. Es sei deshalb im folgenden exemplarisch für gegengekoppelte Lautsprecher skizziert.*

Beim diskutierten Monitor 5 handelt es sich um einen geregelten Dreiweg-Aktivlautsprecher. Der Tieftonkanal besteht aus vier 13-cm-Chassis. Sie sind parallel geschaltet und bilden eine direkt abstrahlende Gruppe. Als Mitteltöner dient eine 41-mm-Kalotte, als Hochtöner eine 27-mm-Kalotte. Die einzelnen Chassis sind zwar dynamische Wandler, doch sind sie zur Verringerung der bei diesen üblichen Fehler durch besonderes Membranmaterial, durch besondere Membranformen und andere Modifikationen bereits erheblich optimiert.

Vor den aus einer Aluminiumlegierung bestehenden Membranen befinden sich formschlüssige und formstabile, feststehende Gegenelektroden aus akustisch hochpermeablem Drahtgeflecht. Zwischen der Membran und der Gegenelektrode wird durch Anlegung einer stabilisierten Gleichspannung von 400 V ein elektrisches Feld erzeugt. Diese Anordnung ist also insgesamt — einfach gesehen — ein integriertes System von Lautsprecher (Magnet, Schwingsspule, Membran) und Konden-

satormikrofon (bewegliche Metallmembran, feststehende Gegenelektrode und elektrisches Feld zwischen beiden). An der Gegenelektrode kann dann bei Ansteuerung des Chassis ein Signal abgegriffen werden, das nach entsprechender Aufbereitung, ein Abbild des von der Membran abgestrahlten Schalles ist. Es kann mit dem Signal verglichen werden, das dem Chassis zugeführt wird. Weichen die beiden Signale voneinander ab, so kann ein Korrektursignal gewonnen und der Schwingspule zugeführt werden, wodurch die aufgetretenen Fehler kompensiert werden.

Ein vereinfachtes Prinzipschaltbild des Monitors zeigt das Bild. Der Eingangsverstärker dient u.a. als Entkopplung von Eingang und nachfolgender Elektronik und als Hf-Sperre. Das nachfolgende aktive Bessel-Filter hat eine Grenzfrequenz von 30 Hz und unterdrückt niederfrequente Störspannungen mit 24 dB/Oktave. Die eigentliche Frequenzweiche besteht aus einem Tiefpaß, einem Bandpaß und einem Hochpaß, die so ausgelegt sind, daß für das Gesamtsignal Allpaßcharakteristik besteht. Die den Potentiometern P 1 bis P 3 folgenden Integratoren sind nötig, um den Frequenzgang (entsprechend der Geschwindigkeitsregelung) zu entzerren. Von ihnen gelangen die Signale der einzelnen Kanäle auf die Gegenelektroden, an denen die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit ermittelt werden. Die dabei entstehenden Spannungen werden in den Verstärkern V 1 bis V 3 ver-

stärkt, in den Endstufen E 1 bis E 3 auf Leistung gebracht und als Korrektursignal auf die Schwingspulen gegeben.

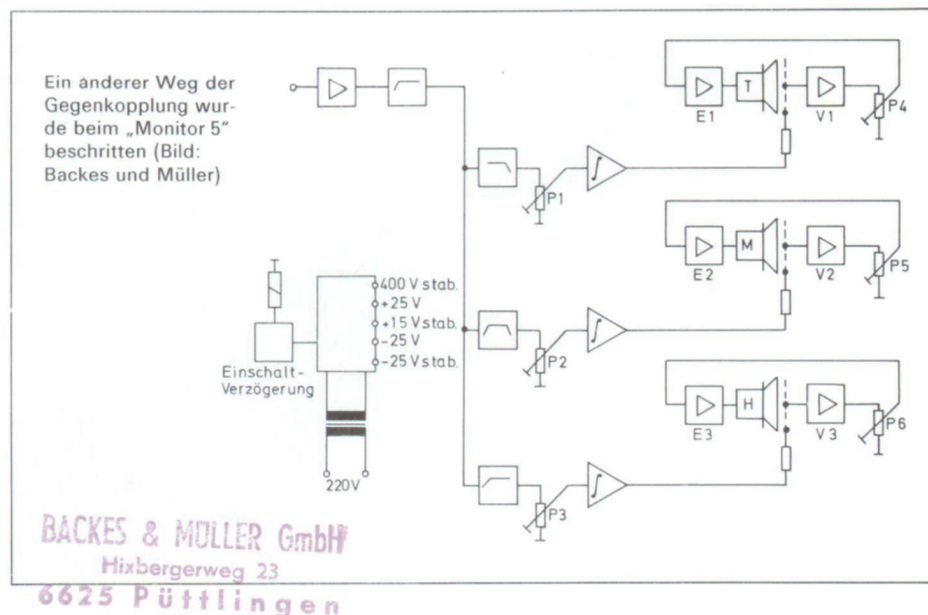
Die Einstellung des akustischen Frequenzganges geschieht mit den Stellern P 1 bis P 6. Wegen der gegenseitigen Abhängigkeit von der jeweiligen PegelEinstellung (P 1 bis P 3) und dem Gegengekopplungsgrad (P 4 bis P 6) kann der Frequenzgang nur mit einer besonderen Meßanordnung im Werk eingestellt werden. Aus diesem Grunde ist es beim Monitor 5 im Gegensatz zu anderen Aktivlautsprechern nicht möglich, die Pegel der einzelnen Kanäle von außen einzustellen. Zudem haben Hörvergleiche gezeigt, daß die akustischen Gegebenheiten in Wohnräumen derart komplex sind, daß ihnen mit den üblichen Einstellungen an Lautsprechern nicht zufriedenstellend „beizukommen“ ist.

Der hier zur Diskussion stehende Lautsprecher hat eine Eingangsimpedanz von 27 k Ω und benötigt zur Vollaussteuerung 1 V. Sein Netzteil ist so ausgelegt, daß den drei Endstufen eine Dauerleistung von 150 W zugeführt werden kann.

Das Gehäuse des Aktivlautsprechers ist 38 mm stark und nußbaumfurniert. Seine Abmessungen orientieren sich nicht am Marktüblichen. Sie stehen im Verhältnis des Goldenen Schnitts zueinander: 54 cm Höhe, 38 cm Breite und 27 cm Tiefe. Der Lautsprecher hat ein Gewicht von 24 kg.

Im Gegensatz zu einigen anderen Aktivlautsprechern hat der Monitor 5 keine automatische, signalgesteuerte Einschaltung. Er muß also „von Hand“ ein- und ausgeschaltet werden, was natürlich auch bei entsprechendem Vorverstärkerkonzept mit der Einschaltung dieses Geräts geschehen kann. Als Betriebsanzeige befindet sich unter dem Firmenschild im Rahmen des Lautsprechers eine rote Leuchtdiode.

Bodo Elfte



* Die theoretischen Grundlagen sowie technische Probleme und Details der Membrangegekopplung werden demnächst an dieser Stelle dargelegt.

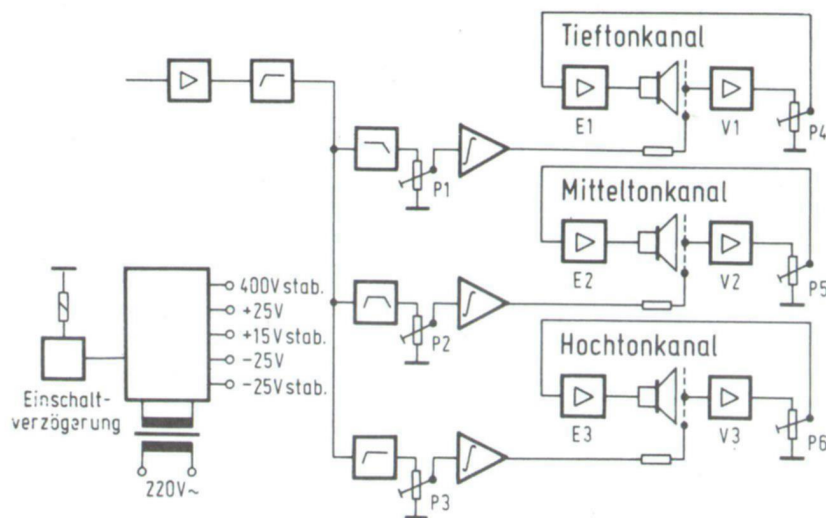


Bild 9. Vereinfachte Blockschaltung des Monitor 5

rumpeln und andere tieffrequente Störungen von den Chassis fernhält. Er hat eine Bessel-Charakteristik, um hohe Flankensteilheit mit gutem Einschwingverhalten zu vereinen. Seine Grenzfrequenz beträgt 30 Hz, die Flankensteilheit ist 24 dB/Okt.

Die Frequenzweiche besteht aus einem Tiefpaß, einem Bandpaß und einem Hochpaß. Die mit Operationsverstärkern aufgebaute Schaltung sorgt dafür, daß die Toleranzen gering bleiben. Die Filter sind so ausgelegt, daß sie, wenn man ihre Ausgangsspannungen addiert, für das Signal einen reinen Allpaß darstellen. Mit den Einstellpotentiometern P1...P3 wird der akustische Frequenzgang eingestellt. Diese Einsteller werden zusammen mit den Einstellern für die Membrangegegnkopplung im Werk mit Hilfe spezieller Meßeinrichtungen abgeglichen.

Die den Einstellpotentiometern folgenden Operationsverstärker sind als aktive Integratoren geschaltet und korrigieren den durch die Geschwindig-

keitsregelung entstehenden Frequenzgang von 6 dB/Okt. Anschließend gelangen die drei Signale zu den kapazitiven Gebern, an denen durch Differenzbildung die Abweichungen zwischen Soll- und Istgeschwindigkeiten ermittelt werden. Die dabei entstehenden Spannungen werden durch die auf der Schallwand angebrachten Verstärker V1...V3 auf etwa 500 mV angehoben, in den Endverstärkern E1...E3 nochmals verstärkt und als Korrektursignale auf die Schwingspulen gegeben. Zur Einstellung der Gegenkopplungsgrade dienen die Potentiometer P4...P6.

Das Netzteil versorgt die Endstufen mit Spannung und liefert die stabilisierten Betriebsspannungen für die Vorstufen und Regelverstärker. Außerdem gibt es eine stabilisierte Gleichspannung von 400 V zur Erzeugung des für die Membrangegegnkopplung notwendigen Feldes ab. Eine Einschaltverzögerung sorgt dafür, daß die Lautsprecherchassis erst dann an die Endverstärker angeschaltet werden, wenn alle Betriebsspannungen ihre endgültigen Werte er-

Technische Daten des Monitor 5

Lautsprecherbestückung:	4 Tieftonsysteme, 130 mm ϕ 1 Mittelton-Kalottensystem, 41 mm ϕ 1 Hochton-Kalottensystem, 27 mm ϕ
Endverstärker:	gleichspannungsgekoppelte komplementäre Endverstärker mit Differenzeingang
Ausgangsleistung	70 W
Tiefenbereich:	40 W
Mittelenbereich:	40 W
Hochtonbereich:	40 W
Frequenzweiche:	aktive RC-Filter mit 12 dB/Oktave Flankensteilheit, Übergangsfrequenzen 700 Hz, 3,5 kHz
Regelverstärker:	9 Operationsverstärker in diskreter Bauweise, davon 3 mit rauscharmem FET-Eingang
Halbleiterbestückung:	64 Transistoren, 32 Dioden
Eingangsempfindlichkeit:	1,5 V _{eff}
Eingangswiderstand:	27 k Ω
Akustischer Phasen-Frequenzgang (innerhalb $\pm 15^\circ$)	
Tiefenbereich:	22...800 Hz
Mittelenbereich:	270...8500 Hz
Hochtonbereich:	900...12 000 Hz
Akustischer Amplituden-Frequenzgang (nach DIN 45 500):	30...20 000 Hz
Abmessungen:	380 mm $\times$ 540 mm $\times$ 270 mm

reicht haben und Einschaltgeräusche nicht mehr auftreten.

Auf die bei aktiven Lautsprecherboxen leicht realisierbare Möglichkeit, den Frequenzgang von außen einstellbar zu machen, wurde bewußt verzichtet. Bei unterschiedlichen Hörtests hat es sich nämlich immer wieder herausgestellt, daß Fehler der Raumakustik so komplexer Natur sind, daß sie sich nicht durch eine Frequenzgang-Verzerrung kompensieren lassen. (Auch in einem akustisch schlechten Raum klingt eine gute Geige wie eine gute Geige. Niemand käme auf die Idee, den Hörge-
nuß im schlechten Raum durch Verändern der Geige verbessern zu wollen.)

Wolfgang Clemens Backes und Friedrich Müller

Aktiver Lautsprecher mit kapazitiver Membrangegenkopplung

Gegenkopplungen, in die der Lautsprecher einbezogen ist, um auch den durch ihn erzeugten Klirrfaktoranteil zu verringern, sind schon seit längerem bekannt (vgl. FUNKSCHAU 1973, Heft 18, Seite 691). Im vorliegenden Beitrag wird ein neuartiger Lautsprecher beschrieben, bei dem versucht wurde, durch kapazitive Membrangegenkopplung die Regelungstechnik konsequent zur Verbesserung der Wiedergabequalität einzusetzen.

Regelungstechnik bei Lautsprechern

Bei der Schallübertragung mit Hilfe von Lautsprechern spielt die Bewegung der Membran eine entscheidende Rolle. Mißt man mit einem geeigneten Verfahren die Bewegung der Membran, und zwar integriert über die gesamte abstrahlende Fläche, und stellt sie als elektrische Größe dar, dann läßt diese sich dazu benutzen, Abweichungen vom Sollwert der Membranbewegung durch Gegenkopplung auszugleichen, solange diese noch klein sind. Dabei ist es wichtig, bereits kleine Abweichungen zu erkennen und so zu regeln, daß keine Instabilität auftritt.

Die frei schwingende Lautsprechermembran gehorcht dem Gesetz

$$M \cdot \ddot{x} + R \cdot \dot{x} + D \cdot x = 0 \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{M} - \frac{R^2}{4M^2}} \quad (2)$$

Darin ist M = bewegte Masse, D = Federkonstante der Aufhängung, R = mechanische Dämpfung, ω = Resonanzfrequenz und x = Auslenkung.

Der Zusammenhang zwischen dem Schalldruckverlauf und der momentanen Verschiebungsamplitude x der Luftmoleküle (und somit der Auslenkung der Lautsprechermembran, die diese Verschiebung hervorruft), ergibt sich nach dem Newtonschen Gesetz zu

$$A \cdot \sin \omega t = k \cdot x \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t \quad (3)$$

Der momentane Schalldruck bei sinusförmiger Ansteuerung ist also gegenüber der Auslenkung nicht nur verzögert, sondern auch mit ω^2 frequenzabhängig. Um einen waagerechten Frequenzgang zu erreichen, muß also die Membranamplitude mit $1/\omega^2$ zu höheren Frequenzen hin abfallen.

Wenn bei einem Lautsprecher die Rückstellkraft der Aufhängung vernachlässigt werden kann, also oberhalb der Resonanzfrequenz, ergibt sich ein waagerechter Frequenzgang zufällig von selbst. Der Frequenzgang stimmt also mit der Forderung überein, das Phasenverhalten jedoch nicht.

Bei einer Regelung der Membranbewegung kann man frei wählen, ob Abweichungen vom Sollwert der Auslenkung, der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung korrigiert werden sollen. Jede dieser Größen läßt sich mit einem geeigneten Abtastverfahren mechanisch oder elektrisch gewinnen. Im ersten Fall wird eine auslenkungsabhängige Kraft in Gleichung (1) addiert oder subtrahiert. Das bedeutet, daß die Rückstellkraft $D \cdot x$ scheinbar vergrößert oder verkleinert wird. Aus Gleichung (2) ergibt sich dann eine beliebige Verschiebung der Resonanz nach höheren oder tieferen Frequenzen. Das System wird instabil, wenn die Rückstellkraft negativ wird.

Bei einer Gegenkopplung der Beschleunigung wird in Gleichung (1) das

Glied $M \cdot \ddot{x}$ vergrößert oder verkleinert, also durch scheinbar vergrößerte oder verkleinerte Masse die Resonanzfrequenz erniedrigt oder erhöht. Das System wird instabil, wenn die Masse kleiner als Null gemacht wird.

Beide bisher beschriebenen Verfahren haben jedoch einen erheblichen Nachteil: Wegen der Äquivalenz von beschleunigungsproportionaler Kraft und frequenzabhängiger negativer Rückstellkraft läßt sich die Stabilitätsbedingung nur wahlweise oberhalb oder unterhalb der Resonanzfrequenz erfüllen, nicht aber im gesamten Frequenzbereich. Eine technische Realisierung eines dieser Verfahren ist daher nur bei kleinen Gegenkopplungsgraden möglich, d. h. solange die mechanischen Kräfte bestimmend bleiben.

Die dritte Möglichkeit ist die Regelung der Geschwindigkeit, in Gleichung (1) also eine Veränderung der Dämpfungs-

kraft $R \cdot \dot{x}$. Aus Gleichung (2) ist zu ersehen, daß dabei die Resonanzfrequenz nicht nur verschoben werden kann, sondern daß sie für $R^2/(4M^2) > D/M$ nicht mehr existiert. Es handelt sich dann nicht mehr um ein schwingungsfähiges System, d. h. die Membran

führt nur noch die erzwungene Bewegung aus und ist somit im gesamten Frequenzbereich stabil regelbar. Als Integral der Beschleunigung weist der Betrag der Geschwindigkeit allerdings eine frequenzabhängige Dynamik von 6 dB/Okt. auf.

Die Regelung der Geschwindigkeit statt der Auslenkung oder der Beschleunigung ist also das einzige Verfahren, das es erlaubt, sowohl unterhalb als auch oberhalb der Lautsprecherresonanz die Bewegung zu kontrollieren. Grenzen der Regelbarkeit ergeben sich erst durch die Laufzeit der Schallwelle vom Schwingspulendraht bis zur Oberfläche der Membran, durch Biegewellen in der Membran sowie durch Unzulänglichkeiten der Elektronik. Die genannten mechanischen Faktoren sind über Membranmaterial und Membranform beherrschbar. Phasenverschiebungen in der Elektronik können durch ein entsprechend sauberes Konzept vermieden werden.

Ein besonders zweckmäßiges Verfahren zur Umwandlung der Membranbewegung in eine elektrische Größe ist die elektrostatische (kapazitive) Abtastung. Dabei ergeben sich folgende Vorteile:

- Wenig zusätzliche Masse auf der Membran. Die notwendige Leitfähigkeit ist bei Metallmembranen bereits vorhanden und läßt sich bei Papp- und Kunststoffmembranen leicht erreichen.
- Man erhält ein über die gesamte schallabstrahlende Fläche integriertes Signal. Das elektrische Signal entspricht also genau dem abgestrahlten Schall und enthält alle Verformungen der Membran.
- Es ist möglich, Amplitude oder Geschwindigkeit direkt abzugreifen.
- Leichter als bei dynamischer Abtastung lassen sich Übersprechen von der Schwingspule sowie Einstreuungen von außen abschirmen.

Nachteilig ist, daß eine Hochspannung zum Aufbau des elektrischen Feldes benötigt wird. Ferner muß äquidistant zur Membranoberfläche ein schalldurchlässiges Gitter angebracht werden, und es muß, um den Einfluß von Paritärkapazitäten gering zu halten, direkt auf die Schallwand Elektronik aufgebaut werden.

Grundlagen der kapazitiven Membrangegenkopplung

Das Kernstück der kapazitiven Membrangegenkopplung ist im Grunde

nichts anderes als ein für diesen speziellen Zweck abgewandeltes Kondensatormikrofon. Während bei einem Kondensatormikrofon eine leichte Membran durch Luftschall in Schwingungen versetzt wird, ist hier die Mikrofonmembran unmittelbar auf der Lautsprechermembran aufgebracht und macht ihre Bewegungen exakt mit. Die Ausgangsspannung dieses Mikrofons ist dann – nach geeigneter Aufbereitung – ein genaues Abbild des von der Membran abgestrahlten Schalles. Sie wird

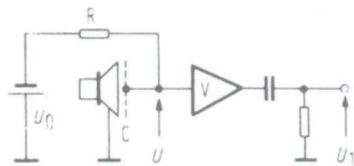


Bild 1. Ableitung einer der Membrangeschwindigkeit proportionalen Spannung U_1 durch kapazitive Abtastung der Membranauslenkung und anschließende Differentiation der dabei erhaltenen Spannung U

mit dem wiederzugebenden Tonfrequenzsignal verglichen, und die Abweichungen zwischen den beiden Signalen werden als Korrektursignal auf die Schwingspule gegeben.

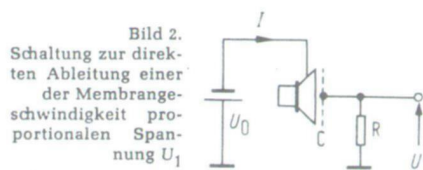
Wie bei einem Kondensatormikrofon, muß auch hier die Membran elektrisch leitend sein. Papp- oder Gewebemembranen erhalten dazu einen dünnen Metallbelag oder man muß Leichtmetall als Membranmaterial verwenden. Vor der Membran befindet sich eine feste Gegenelektrode. Sie besteht aus einem feinen, schalldurchlässigen Drahtgeflecht, das die Form der Membran hat. Dieses Gitter ist von der Membran isoliert und so weit von ihr entfernt, daß sie auch bei größter Auslenkung nicht daran anstoßen kann.

Membran und Gegenelektrode bilden einen Kondensator, dessen Kapazität von der Membranauslenkung abhängt. Wenn die Membran keine Teilschwingungen macht, dann ist diese Kapazität dem Abstand der beiden Elektroden umgekehrt proportional. Wenn Teilschwingungen auftreten, ist die Kapazität des Gebers umgekehrt proportional zu einem mittleren Elektrodenabstand. Da ein solcher enger Zusammenhang zwischen Geberkapazität und Elektrodenabstand besteht, ist es möglich, aus der Geberkapazität eine Größe herzuleiten, die dem mittleren Elektrodenabstand und damit der Membranauslenkung entspricht. Aus dieser kann man dann durch anschließendes Differenzieren die Membrangeschwindigkeit herleiten. Dieses Verfahren ist in Bild 1 dargestellt.

Die Schaltung entspricht der bei Kondensatormikrofonen üblichen. Über einen großen Widerstand R liegt eine Gleichspannung U_0 an der aus Membran und Gegenelektrode bestehenden

und vom (zeitabhängigen) mittleren Elektrodenabstand $s(t)$ abhängenden Kapazität C . Diese Spannung ruft auf C eine Ladung Q hervor, die bei hinreichend großem R auch bei Auslenkung der Membran als konstant angesehen werden kann. Die Spannung U , die sich an C einstellt, ist dann von $s(t)$ abhängig und in jedem Augenblick proportional s .

Über einen Impedanzwandler V , der einen hohen Eingangswiderstand und einen niedrigen Ausgangswiderstand



hat, gelangt das Signal zu einem RC-Glied, dessen Zeitkonstante so bemessen ist, daß es bei allen vorkommenden Frequenzen die zeitliche Ableitung seines Eingangssignales liefert. U_1 ist somit proportional der Größe $ds(t)/dt$, also der Membrangeschwindigkeit.

Dieses Verfahren hat allerdings einen Nachteil. Da bei einem Lautsprecher die Membranamplitude bei konstantem Schalldruck umgekehrt proportional dem Quadrat der Frequenz ist, sind die Membranamplituden je nach Frequenz sehr unterschiedlich. Die in Bild 1 auftretende Spannung U ist proportional dieser Membranamplitude und demnach auch mit dieser großen Dynamik behaftet. An den nachfolgenden Impedanzwandler werden dadurch hohe Anforderungen gestellt, die nur schwer zu erfüllen sind.

Wird beispielsweise ein Mitteltontonsystem im Frequenzbereich von 500 Hz bis 4 kHz betrieben, dann ist bei konstantem Schalldruck die Membranamplitude bei der unteren Grenzfrequenz 64mal so groß wie bei der oberen. Das entspricht einer Dynamik von 36 dB. Soll nun ein Musiksignal mit einer zusätzlichen Dynamik von 45 dB übertragen werden, so müßte der Impedanzwandler eine Dynamik von $36 + 45 = 81$ dB verarbeiten. Dies ist aber ein Wert, der kaum zu realisieren ist. Daher ist es zweckmäßiger, die Membrangeschwindigkeit derart herzuleiten, daß an keiner Stelle der Anordnung eine Spannung auftritt, die der Membranamplitude proportional ist.

Dazu dient die Schaltung in Bild 2. Hier liegt wieder die konstante Spannung U_0 an der Geberkapazität C . R ist diesmal aber sehr klein, so daß er den Strom I durch C nicht beeinflußt. An R fällt dann eine Spannung U_1 ab, die proportional I ist. Aus der hier geltenden mathematischen Beziehung ergibt sich, daß U_1 bei hinreichend geringer

Auslenkung proportional der Membrangeschwindigkeit $ds(t)/dt$ ist. Eine Fourier-Analyse dieser Beziehung ergibt, daß bei sinusförmiger Membranauslenkung der k_2 -Anteil von U_1 kleiner als 1 % und der k_3 -Anteil kleiner als 0,1 % ist, solange die Membranauslenkung $1/100$ des Ruheabstandes zwischen den Elektroden nicht überschreitet.

Nachdem nun also eine Spannung hergeleitet ist, die der Membrangeschwindigkeit entspricht, könnte diese Spannung in einem Differenzverstärker DV (Bild 3) mit dem Nf-Signal verglichen und die Abweichung als Korrektursignal auf die Schwingspule gegeben werden. Allerdings tritt auch hier wie-

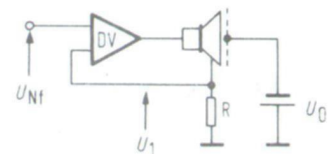


Bild 3. Erzeugung des Korrektursignals durch Vergleich von U_1 und des Nf-Signals U_{Nf} in einem Differenzverstärker

der ein Dynamikproblem auf. Die Membrangeschwindigkeit ist bei konstantem Schalldruck proportional der reziproken Frequenz. Das bedeutet bei obigem Beispiel des Mitteltontonsystems, daß eine Dynamik von immerhin noch $18 + 45 = 63$ dB verarbeitet werden muß, woraus ein schlechter Rauschabstand resultiert.

Hier läßt sich mit der Schaltung nach Bild 4 Abhilfe schaffen. Da das vom kapazitiven Geber gelieferte Istsignal direkt an der Elektrode mit dem Sollsignal verglichen wird, erhält man an keiner Stelle der Schaltung ein Signal, das mit der oben beschriebenen Dynamik behaftet ist. Durch die Gegenkopplung über den Endverstärker E wird nämlich in jedem Augenblick die Spannung U_2 zu Null gemacht. Dies erfolgt zwangsläufig dadurch, daß sich die Membran in jedem Augenblick mit der Sollgeschwindigkeit bewegt.

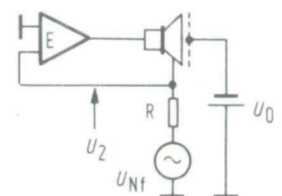


Bild 4. Vergleich des vom kapazitiven Geber gelieferten Istsignals mit dem Sollsignal direkt an der Geberelektrode

Auf diese Weise wird also erreicht, daß die Membrangeschwindigkeit der Eingangsspannung entspricht. Um einen frequenzunabhängigen Schalldruck zu erzielen, müßte aber die Membranbeschleunigung der Eingangsspannung

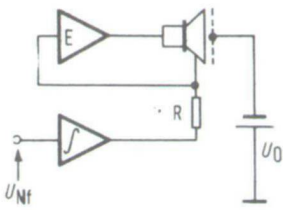


Bild 5. Vereinfachte Gesamtschaltung der kapazitiven Membrangegenkopplung

entsprechen, oder – anders ausgedrückt – die Membrangeschwindigkeit müßte dem Integral der Eingangsspannung entsprechen. Daher wird U_{Nf} integriert, bevor man sie mit dem Gebersignal vergleicht. Als vereinfachte Gesamtschaltung ergibt sich dann Bild 5.

Die Idee, die Membran kapazitiv abzutasten und ihre Geschwindigkeit zur Regelung zu verwenden, wurde erstmals 1928 von Maurice Trouton in der britischen Patentschrift 320,713 veröffentlicht. Die Schwierigkeiten bei der Verwirklichung dieser Idee schienen jedoch so groß, daß das Verfahren später in der Literatur für undurchführbar gehalten wurde.

Anwendung der kapazitiven Membrangegenkopplung im Lautsprecher

Die Lautsprecherbox Monitor 5 (Bild 6) der Backes & Müller GmbH, Saarbrücken, ist ein aktiver Dreiweg-Lautsprecher mit elektronischer Frequenzweiche (Abmessungen 540 mm x 380 mm x 270 mm). Alle drei Kanäle sind über die Membran gegengekoppelt. Für die Lautsprecherchassis konnten die üblichen Standardteile und -herstellungsverfahren wegen der neuen Technik nicht übernommen werden. Sie stammen daher aus eigener Fertigung.

Im Tieftonkanal sind vier 13-cm-Chassis parallel geschaltet und als direkt abstrahlende Gruppe angeordnet. Im Mitteltonkanal arbeitet ein Kalottensystem mit 41 mm Membrandurchmesser (Bild 7) und im Hochtonkanal ein Kalottenchassis mit 27 mm Membrandurchmesser. Zu den Maßnahmen zur Unterdrückung von Teilschwingungen und BiegeWellen gehört, daß die Membran nicht gleichzeitig als Einspannung benutzt wird.

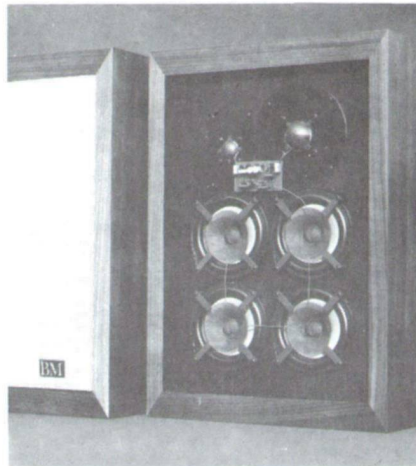
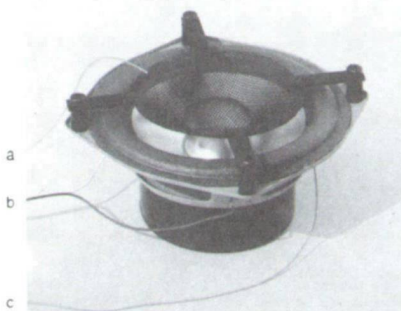


Bild 6. Aktive Lautsprecherbox Monitor 5 mit kapazitiver Membrangegenkopplung

Wie bereits ausgeführt, ist es für die Membrangegenkopplung wichtig, daß die Laufzeiten des Schalles in der Membran möglichst kurz sind. Dies wurde durch Optimierung der Membranform und des Membranmaterials erreicht. Bei den Tieftönern konnte die Laufzeit von der Schwingspule bis zum schwingspulenfernsten Punkt unter 0,15 ms gehalten werden, beim Mitteltöner unter 0,03 ms und beim Hochtöner unter 0,02 ms¹⁾.

Die Membranen werden mit Spezialwerkzeugen gezogen. Die Tieftonmembranen bestehen aus einer 180 µm dicken, die Mittel- und Hochtonmembranen aus einer 80 µm dicken Leichtmetalllegierung. Infolge der kurzen Laufzeiten treten Phasenverschiebungen innerhalb der Membran erst bei Frequenzen außerhalb des Betriebsbereiches der Chassis auf. Dies trägt mit dazu bei, daß mit den verwendeten Lautsprechersystemen auch bereits ohne Membrangegenkopplung eine sehr gute Wiedergabequalität zu erzielen ist. Die Gegenelektroden bestehen wegen der besseren Schalldurchlässigkeit nicht aus Lochblech, sondern aus einem Drahtgewebe, das durch besondere Verprägung formstabil ist.

¹⁾ Die verringerte Laufzeit ist auch einer der Gründe dafür, daß vier kleine Tieftöner anstelle eines großen eingebaut wurden.

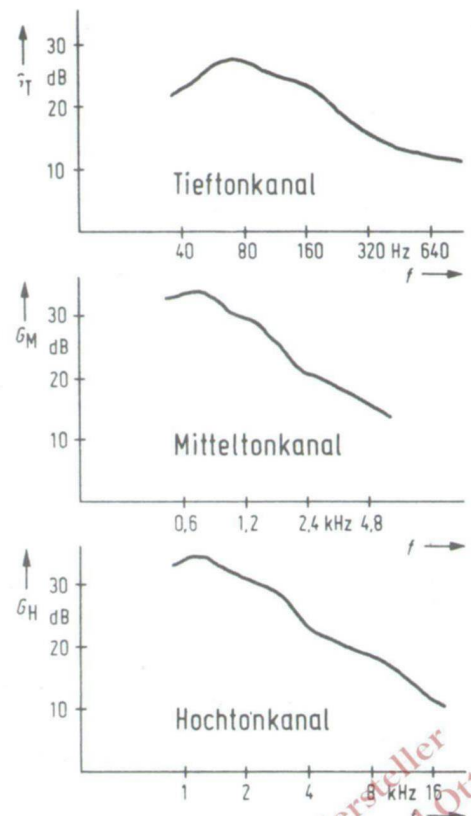


Bild 8. Gegenkopplungsgrade in den einzelnen Kanälen des Monitor 5

Die Membrangegenkopplung konnte bis auf mehrere Oktaven oberhalb der Chassis-Grundresonanzen ausgedehnt werden. Dabei erreicht man im gesamten genutzten Frequenzbereich beachtliche Gegenkopplungsgrade (Bild 8). Als Gegenkopplungsgrad G wird hier das Verhältnis von Schalldruck ohne Membrangegenkopplung zu Schalldruck mit Membrangegenkopplung unter der Voraussetzung einer konstanten Eingangsspannung bezeichnet.

Bild 9 zeigt ein vereinfachtes Prinzipschaltbild des Monitor 5. Ein Eingangsverstärker verstärkt das Eingangssignal auf etwa 3 V und entkoppelt den Eingang von der nachfolgenden Elektronik. Außerdem wirkt er als Hochfrequenzsperrschaltung. Dem Eingangsverstärker folgt ein aktiver Hochpaß, der Plattenspieler-

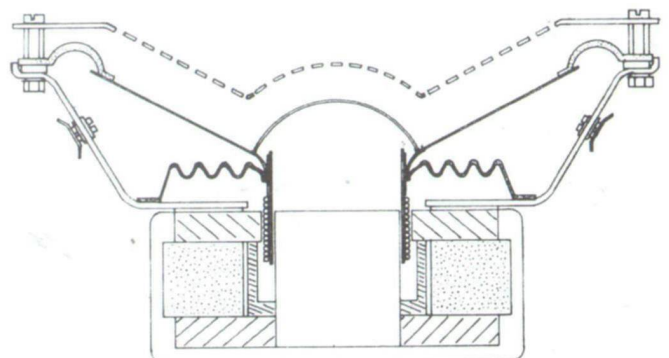


Bild 7. Ansicht und Schnitt-darstellung eines 13-cm-Tieftonchassis (a = zur Signalauswertung, b = zum Endverstärker, c = zum Hochspannungsteil)