

MONITOR 5

Ein aktiver Lautsprecher mit Membrangegenkopplung

---

Backes & Müller GmbH 66 Saarbrücken Martin-Luther-Str. 14

## Vorwort

Das vorliegende Manuskript befaßt sich mit einem neuartigen Lautsprecher, bei dem versucht wurde, durch Membrangegenkopplung die Regelungstechnik konsequent zur Verbesserung der Wiedergabequalität einzusetzen.

Mit dieser Neuentwicklung sollte ein weiterer Schritt in die erfreuliche Richtung gegangen werden, die der Lautsprecherbau in jüngerer Zeit eingeschlagen hat. Die Elektronik sollte mehr als bisher genutzt werden, um Fehler von Lautsprechern wirkungsvoll zu kompensieren. Wir glauben, daß diese Methode, Lautsprecherprobleme anzugehen und zu lösen, Zukunft hat.

Die vorliegende Schrift wollen wir als sachdienlichen Beitrag zum Verständnis einiger mit dem Eindringen der Elektronik in den Lautsprecherbau zusammenhängender Probleme verstanden wissen.

Im September 1974

Backes & Müller GmbH

### Inhalt:

- A Regelungstechnik bei Lautsprechern
- B Grundlagen der kapazitiven Membrangegenkopplung
- C Anwendung der Membrangegenkopplung bei dem MONITOR 5

## A Regelungstechnik bei Lautsprechern

1. Bei der Schallübertragung mit Hilfe von Lautsprechern spielt die Bewegung der Membran eine entscheidende Rolle. Zur elektrischen und akustischen Vermessung dieser Bewegung gibt es verschiedene Verfahren. Es sollen hier nur solche Verfahren beschrieben werden, die es gestatten, die Bewegung der Membran, integriert über die gesamte abstrahlende Fläche, in eine elektrische Größe abzubilden.

Nicht beschrieben werden also Messungen über ein Mikrofon, sowie das Abtasten an einzelnen Punkten (z.B. Schwingenspule), da diese Verfahren die für eine Membrangegenkopplung notwendige vollständige Information nicht liefern.

Das Wissen um die tatsächliche Bewegung der Membranoberfläche läßt sich dazu benutzen, Abweichungen von deren Sollwert auszugleichen, solange diese noch klein sind. Dabei ist es wichtig, bereits kleine Abweichungen zu erkennen und so zu regeln, daß keine Instabilität auftritt.

2. Zur Verwandlung von Bewegungsgrößen in elektrische Spannungen gibt es die folgenden Möglichkeiten:
- a) elektrostatisch: die elektrisch leitend gemachte Lautsprechermembran bewegt sich in einem elektrostatischen Feld und erhält durch Influenz eine ortsabhängige Spannung. Ebenso kann eine geladene Membran das elektrische Feld selbst erzeugen, dessen Veränderung bei Bewegung dann von festen Elektroden gemessen wird.
  - b) magnetisch: analog ist es hier möglich, die Membran entweder zur Herstellung oder zur Messung des magnetischen Feldes zu nutzen. Da die Herstellung magnetischer Felder jedoch schwere Dauermagnete oder große Stromstärken erfordert, bleibt nur die Messung über die Membran. Hier kann man den bewährten Hall-Generator oder das dynamische Prinzip anwenden und dünne Drähte durch die Membran flechten.
  - c) piezoelektrisch<sup>1)</sup>: ein feststehender Kristall kann mechanisch mit der Membran verbunden werden.

---

1) dies ist, streng genommen, auch ein elektrostatisches Verfahren, wird aber wegen seiner selbständigen technischen Bedeutung hier eigens erwähnt.

Dabei beeinflusst die Messung das Meßergebnis allerdings so stark, daß nur die Möglichkeit bleibt, den Kristall mit der Membran zu bewegen und seine durch Beschleunigung hervorgerufene Verformung zur Spannungsgewinnung zu nutzen.

d) verschiedene Hilfskonstruktionen: denkbar sind Hilfskonstruktionen, bei denen die Lautsprechermembran erst eine nichtelektrische Größe verändert, die ihrerseits leichter elektrisch meßbar ist. So kann man z.B. durch die Membran einen Lichtstrahl modulieren oder einen Spannungsteiler einstellen lassen. Von magnetisch permeablen Membranen sind über radioaktive Membranen bis zu Echolotverfahren der Phantasie keine Grenzen gesetzt.

Wohlbekannt in der Akustik sind die Verfahren a) bis c) im Mikrofonbau. Auch optische Mikrofone sind bereits vorgeschlagen worden. Ein Spannungsteiler nach d) ist beispielsweise das Kohlekörnermikrofon.

3. Nach der Aufzählung der verschiedenen Arten der Membranabtastung soll untersucht werden, wie eine Regelung der Membranbewegung aussehen kann.

Die frei schwingende Lautsprechermembran gehorcht bekanntlich dem Gesetz:

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

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

worin M bewegte Masse  
D Federkonstante der Aufhängung  
R mechanische Dämpfung  
 $\omega$  Resonanzfrequenz  
x Auslenkung

Dies sei nur deshalb erwähnt, weil später auf die verwendeten Bezeichnungen zurückgegriffen wird.

Ein 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:

$$A \sin \omega t = k \times \omega^2 \cos \omega t$$

Der momentane Schalldruck bei sinusförmiger Ansteuerung ist also gegenüber der Auslenkung nicht nur verzögert, sondern auch mit  $\omega^2$  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: ist bei einem dynamischen Lautsprecher der Schwingstrom und damit die auf die Membran wirkende Kraft proportional  $\sin \omega t$ , dann ist die Auslenkung proportional  $\frac{\sin \omega t}{\omega^2}$ . Der Frequenzgang stimmt also mit der Forderung überein, das Phasenverhalten 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 aus jedem der früher beschriebenen Abtastverfahren mechanisch oder elektrisch gewinnen.

Im ersten Fall wird eine auslenkungsabhängige Kraft in Gl. (1) addiert oder subtrahiert. Das bedeutet, daß die Rückstellkraft  $D \times$  scheinbar vergrößert oder verkleinert wird. Aus (2) ergibt sich dann eine beliebige Verschiebung der Resonanz nach höheren oder tieferen Frequenzen. Das System wird instabil, wenn die Rückstellkraft negativ wird. Die hier auftretenden Spannungen sind quadratisch von der Frequenz abhängig. Das heißt, bei einem Frequenzumfang von 10 Oktaven muß, wenn im gesamten Bereich geregelt wird, eine Dynamik von 120 dB verarbeitet werden. Erlaubt man wegen des Störabstandes eine kleinste Spannung von 1 mV, dann müssen Spannungen bis zu 1000 V beherrscht werden. Zu addieren ist jetzt noch die Dynamik des Eingangssignals.

Keinerlei Dynamikprobleme treten bei einer Gegenkopplung der Beschleunigung auf, da die Beschleunigung im gesamten Übertragungsbereich konstant ist. In diesem Fall wird in (1) das Glied  $M \ddot{x}$  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 jetzt beschriebene Verfahren haben einen gravierenden Nachteil: wegen der Äquivalenz von beschleunigungsproportionaler Kraft und einer frequenzabhängigen negativen 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 nur bei kleinen Gegenkopplungsgraden möglich, d.h. solange die mechanischen Kräfte bestimmend bleiben.

Dritte Möglichkeit ist die Regelung der Geschwindigkeit, in Gl.(1) also eine Veränderung der Dämpfungskraft  $R \dot{x}$ . In Gl.(2) ist zu sehen, daß dabei die Resonanzfrequenz nicht nur verschoben werden kann, sondern 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 eine frequenzabhängige Dynamik von 6 dB/Okt auf. (Eine technische Lösung dieses Dynamikproblems wird im folgenden Aufsatz gezeigt).

4. Es ist in dieser Übersicht nicht möglich, alle Eigenschaften der aufgezählten Verfahren zur Abtastung und Regelung zu beschreiben. Es soll im folgenden nur versucht werden, die Behauptung zu begründen, das elektrostatische Abtasten und das Regeln der Geschwindigkeit seien die eleganteste Lösung für das Problem der Membrangegenkopplung.
- Als Vorteile des kapazitiven Abtastens ergeben sich
- wenig zusätzliche Masse auf der Membran; die notwendige Leitfähigkeit ist bei Metallmembranen bereits vorhanden und läßt sich bei Papp- und Kunststoffmembranen leicht herstellen.
  - 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 Parasitärkapazitäten gering zu halten, direkt auf das Chassis-Elektronik aufgebaut werden.

Die Regelung der Geschwindigkeit statt der Auslenkung oder der Beschleunigung ist das einzige Verfahren, das es erlaubt, sowohl unterhalb wie auch oberhalb der Lautsprecherresonanz die Bewegung zu kontrollieren. Obwohl bereits beim aperiodischen Grenzfall die Resonanzfrequenz Null ist, soll trotzdem noch stärker gedämpft werden, da bis jetzt nur von der Unterdrückung der Grundresonanz die Rede ist. Die Überlegenheit des kapazitiven Abtastens zeigt sich jedoch gerade bei der Bekämpfung höherer Resonanzen (Teilschwingungen); es sollte also das Regelungsverfahren eine Gegenkopplung im gesamten Übertragungsbereich zulassen. 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 beherrschbar über Membranmaterial und Membranform. Phasenverschiebungen in der Elektronik können vermieden werden durch eine entsprechend saubere Konzeption.

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

## B Grundlagen der kapazitiven Membrangegekopp lung

Das Kernstück der Membrangegekopp lung ist im Grunde nichts anderes als ein für den speziellen Zweck abgewandeltes Kondensatormikrofon.

Während bei einem Kondensatormikrofon eine leichte Membran durch Luftschall in Schwingungen versetzt wird, ist hier die Mikrofonmembran unmittelbar auf die Lautsprechermembran aufgebracht und macht die Bewegungen der Lautsprechermembran exakt mit. Die Ausgangsspannung dieses Mikrofons ist dann - nach geeigneter Aufbereitung - ein genaues Abbild des von der Membran abgestrahlten Schalles. Sie wird mit dem wiederzugebenden Tonfrequenzsignal verglichen und die Abweichungen zwischen den beiden Signalen werden als Korrektursignal auf die Schwingspule gegengekoppelt.

Wie bei einem Kondensatormikrofon muß auch hier die Membran elektrisch leitend sein. Dazu muß bei Papp- oder Gewebemembranen die Oberfläche mit einem dünnen Metallbelag versehen werden, oder es muß Leichtmetall als Membranmaterial verwendet werden.

Ähnlich wie bei einem Kondensatormikrofon befindet sich vor der Membran eine feste Gegenelektrode. Sie besteht aus einem feinen, schalldurchlässigen Drahtgeflecht, das die Form der Membran besitzt. Dieses Gitter ist von der Membran isoliert und so weit von ihr entfernt, daß die Membran bei größter Auslenkung nicht daran anstoßen kann.

Membran und Gegenelektrode bilden nun eine von der Membranauslenkung abhängige Kapazität. Wenn die Membran keine Teilschwingungen macht, dann ist diese Kapazität umgekehrt proportional zu dem Abstand der beiden Elektroden. Wenn Teilschwingungen auftreten, dann 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 herzustellen, die dem mittleren Elektrodenabstand und damit der Membranauslenkung entspricht. Aus der Membranauslenkung kann man dann durch anschließendes Differenzieren die Membrangeschwindigkeit herleiten. Dieses Verfahren ist in Abb. 1 dargestellt.



Die Schaltung ist bei Kondensatormikrofonen bekannt. Über einen großen Widerstand  $R$  ist eine Gleichspannung  $U_0$  an die aus Membran und Gegen- elektrode bestehende und vom (zeitabhängigen) mittleren Elektrodenabstand  $s(t)$  abhängige Kapazität  $C(s(t))$  gelegt. 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 es gilt

$$U(s(t)) = Q / C(s(t)) .$$

Andererseits ist

$$C(s(t)) = \frac{\epsilon \epsilon_0 \cdot F}{s(t)} ,$$

$\epsilon$  rel. Dielektrizitätskonst.  
 $\epsilon_0$  abs. Dielektrizitätskonst.  
 $F$  Elektrodenfläche

$$\text{Folglich ist } U(s(t)) = \frac{Q \cdot s(t)}{\epsilon \epsilon_0 \cdot F} .$$

Das heißt, die Spannung  $U$  ist in jedem Augenblick proportional  $s$ .

Nach einem Impedanzwandler  $V$ , der einen hohen Eingangswiderstand und einen niedrigen Ausgangswiderstand besitzt, durchläuft das Signal ein RC-Glied, dessen Zeitkonstante so bemessen ist, daß es bei allen vorkommenden Frequenzen die zeitliche Ableitung seines Eingangssignales liefert.  $U_1(s(t))$  ist somit proportional der Größe  $ds(t)/dt$ , also der Membrangeschwindigkeit.

Dieses Verfahren hat allerdings einen Nachteil. Bekanntlich ist bei einem Lautsprecher die Membranamplitude bei konstantem Schalldruck umgekehrt proportional dem Quadrat der Frequenz. Daraus folgt, daß die Membranamplituden je nach Frequenz sehr unterschiedlich sind. Die in Abb.1 auftretende Spannung  $U(s)$  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. Dies sei an einem Beispiel erläutert.

Angenommen, ein Mitteltöner werde in dem 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 ein Musiksignal mit einer zusätzlichen Dynamik von 45 dB übertragen werden, so müsste der Impedanzwandler eine Dynamik von 36 dB + 45 dB = 81 dB verarbeiten. Dies ist ein Wert, der kaum zu realisieren ist.

Zweckmäßiger ist es, die Membrangeschwindigkeit derart herzuleiten, daß an keiner Stelle der Anordnung eine Spannung auftritt, die der Membramplitude proportional ist.

Dies geschieht durch die Schaltung, die in Abb.2 gezeigt ist.

Wieder liegt die konstante Spannung  $U_0$  an der Generkapazität  $C(s(t))$ .  $R$  ist diesmal sehr klein, so daß er den Strom  $I$  durch  $C$  nicht beeinflusst. An  $R$  fällt dann eine Spannung  $U_1(s(t))$  ab, die proportional  $I$  ist.

Es gilt

$$\begin{aligned} \frac{1}{C(t)} \cdot \int I(t) dt &= U_0 \\ I(t) &= U_0 \cdot \frac{dC(t)}{dt} = U_0 \cdot \frac{dC(t)}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} \\ &= -U_0 \epsilon \epsilon_0 F \cdot \frac{1}{s^2(t)} \cdot \frac{ds(t)}{dt} \end{aligned}$$

$$\text{Damit ist } U_1(s(t)) = -R U_0 \epsilon \epsilon_0 F \cdot \frac{1}{s^2(t)} \cdot \frac{ds(t)}{dt} \quad (3)$$

Man sieht, daß  $U_1$  bei hinreichend geringer Auslenkung proportional der Membrangeschwindigkeit  $ds(t)/dt$  ist. Eine Fourier-Analyse der obigen Beziehung ergibt, daß bei sinusförmiger Membranauslenkung der  $k_2$ -Anteil von  $U_1$  kleiner als 1% ist 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 (Abb.3) mit dem Nf-Signal verglichen und die Abweichung als Korrektursignal auf die Schwingenspule gegeben werden.

Allerdings tritt dann auch hier wieder ein Dynamikproblem auf. Die Membrangeschwindigkeit ist bekanntlich bei konstantem Schalldruck proportional der reziproken Frequenz. Das bedeutet bei obigem Beispiel des Mitteltöners, daß eine Dynamik von immerhin noch 18 dB + 45 dB = 63 dB verarbeitet werden muß, woraus ein schlechter Rauschabstand resultiert.

---

1) Aus Gl.(3) kann man unmittelbar ablesen, wie eine Kompensationschaltung für diese Nichtlinearität beschaffen sein muß.

Hier wird mit der Schaltung nach Abb.4 Abhilfe geschaffen. Dadurch, daß 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 geschilderten Dynamik behaftet ist. Durch die Gegenkopplung über den Endverstärker E wird in jedem Augenblick die Spannung U<sub>2</sub> zu Null gemacht. Dies geschieht zwangsläufig dadurch, daß sich die Membran in jedem Augenblick mit der Sollgeschwindigkeit bewegt.

Nun ist also erreicht, daß die Membrangeschwindigkeit der Eingangsspannung entspricht. Um einen frequenzunabhängigen Schalldruck zu erzielen, müßte aber die Membranbeschleunigung der Eingangsspannung entsprechen. Oder, anders ausgedrückt, die Membrangeschwindigkeit müßte dem Integral der Eingangsspannung entsprechen. Daher wird U<sub>1</sub> integriert, bevor sie mit dem Gebersignal verglichen wird. Als vereinfachte Gesamtschaltung ergibt sich Abb.5.

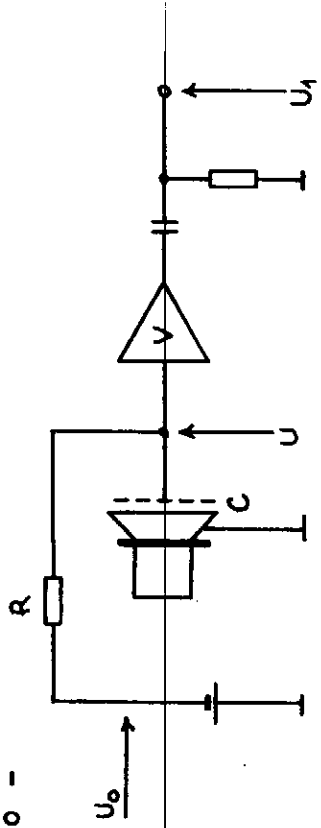


Abb. 1

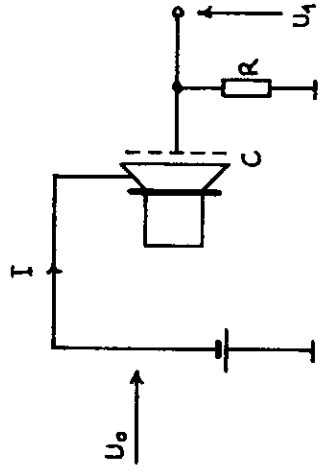


Abb. 2

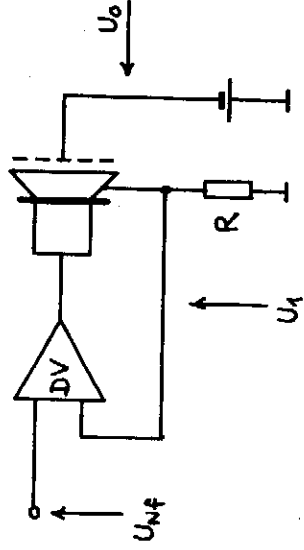


Abb. 3

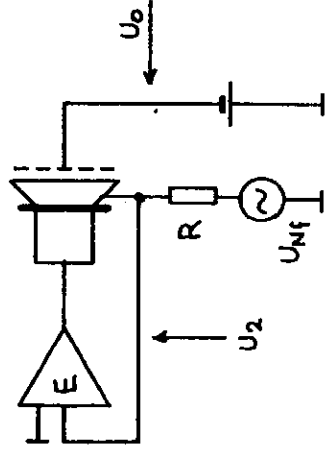


Abb. 4

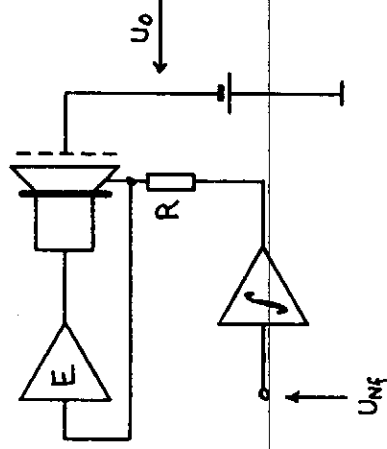


Abb. 5

### C Anwendung der Membrangegenkopplung bei dem MONITOR 5

Ergebnis der mehrjährigen Arbeit, welche die technische Realisierung der Membrangegenkopplung zum Ziel hatte, ist der MONITOR 5.

Der MONITOR 5 ist ein aktiver Dreiweg-Lautsprecher mit elektronischer Frequenzweiche. 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 parallelgeschaltet und als direkt abstrahlende Gruppe angeordnet.

Im Mitteltonkanal arbeitet eine Kalotte mit 41 mm Membrandurchmesser und im Hochttonkanal eine Kalotte mit 27 mm Membrandurchmesser. Zu den Maßnahmen zur Unterdrückung von Teilschwingungen und BiegeWellen gehört, daß die Membran nicht gleichzeitig als Einspannung benutzt wird.

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 schwingspulenfernten Punkt unter 0,15 ms gehalten werden, beim Mitteltöner unter 0,03 ms und beim Hochtöner unter 0,02 ms.<sup>1)</sup>

Die Membranen werden auf eigenen Spezialwerkzeugen gezogen. Die Tieftonmembranen bestehen aus einer 180 µm starken, die Mittel- und Hochttonmembranen aus einer 80 µm starken Leichtmetalllegierung. Aufgrund 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 Chassis auch schon ohne Membrangegenkopplung eine hervorragende Wiedergabequalität zu erzielen ist.

Die Genelektroden bestehen wegen der besseren Schalldurchlässigkeit nicht aus Lochblech, sondern aus einem Drahtgewebe, welches durch besondere Verprägung formstabil ist.

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

Die Membrangegenkopplung konnte bis auf mehrere Oktaven oberhalb der Chassis-Grundresonanzen ausgedehnt werden. Dabei wurden im gesamten genutzten Frequenzbereich beachtliche Gegenkopplungsgrade erreicht (s. Abb.6). Unter Gegenkopplungsgrad soll hier verstanden werden das Verhältnis von Schalldruck ohne Membrangegenkopplung zu Schalldruck mit Membrangegenkopplung unter der Voraussetzung einer konstanten Eingangsspannung.

Abb.7 zeigt ein vereinfachtes Prinzipschaltbild des MONITOR 5.

Ein Eingangsverstärker verstärkt das Eingangssignal auf eine Größe von etwa 3 V und entkoppelt den Eingang von der nachfolgenden Elektronik. Außerdem wirkt er als Hochfrequenzsperrre. Dem Eingangsverstärker folgt ein Hochpass, welcher Plattenspieler-rumpeln und andere tieffrequente Störungen von den Chassis fernhält. Der Hochpass ist aktiv aufgebaut und besitzt Bessel-Charakteristik, um hohe Flankensteilheit mit gutem Einschwingverhalten vereinen zu können. Seine Grenzfrequenz beträgt 30 Hz, seine Flankensteilheit 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 bis P3 wird der akustische Frequenzgang eingestellt. Diese Einsteller werden zusammen mit den Einstellern für die Membrangegenkopplung im Werk mit Hilfe spezieller Messeinrichtungen eingestellt.

Die den Einstellpotentiometern folgenden Operationsverstärker sind als aktive Integratoren geschaltet und korrigieren den durch die Geschwindigkeitsregelung entstehenden 6 dB/Okt-Frequenzgang.

Danach gelangen die drei Signale auf die kapazitiven Geber, an denen durch Differenzbildung die Abweichungen zwischen Soll- und Istgeschwindigkeiten ermittelt werden. Die entstehenden Spannungen werden durch die auf der Schallwand angebrachten Verstärker V1 bis V3 auf etwa 500 mV angehoben, in den Endverstärkern E1 bis E3 nochmals verstärkt und als Korrektursignale auf die Schwingenspulen gegeben.

Zur Einstellung der Gegenkopplungsgrade dienen die Potentiometer P34 bis P6.

Das Netzteil versorgt die Endstufen mit Spannung und hat stabilisierte Ausgänge für die Vorstufen und Regelverstärker. Außerdem liefert es eine stabilisierte Gleichspannung von 400 V zur Erzeugung des für die Membrangegenkopplung notwendigen Feldes. Eine Einschaltverzögerung sorgt dafür, daß die Lautsprecherchassis erst dann an die Endverstärker angeschaltet werden, wenn alle Betriebsspannungen ihre endgültigen Werte erreicht haben und Einschaltgeräusche nicht mehr auftreten.

Bei der Gestaltung des Äußeren des MONITOR 5 wurde Wert auf Schlichtheit gelegt. Die Abmessungen von 54 x 38 x 27 cm<sup>3</sup> stehen im Verhältnis des Goldenen Schnitts.

Auf die bei Aktivboxen leicht realisierbare Möglichkeit, den Frequenzgang von außen einzustellen, wurde bewußt verzichtet. Bei unterschiedlichen Hörtests hat es sich 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 Hörgenuß im schlechten Raum durch Verändern der Geige erhöhen zu wollen.)

Über der Begeisterung bei der Entwicklung des neuen Systems wurde nicht vergessen, auf die bekannten Zuverlässigkeitskriterien zu achten. Die Konzeption des gesamten Gerätes entspricht dem Stand der Technik. Alle wesentlichen Bauteile sind überdimensioniert. Beispiel für die solide Konstruktion ist die Wandstärke des Gehäuses von 4 cm. Eng tolerierte Bauteile verbürgen die Einhaltung der errechneten Daten. Die Sorgfalt bei der Fertigung sowie zahlreiche Zwischenkontrollen und ein 24stündiger Dauertest sichern die gleichbleibende Qualität.

Die Gegenkopplungsgrade  $G$  in den einzelnen Kanälen

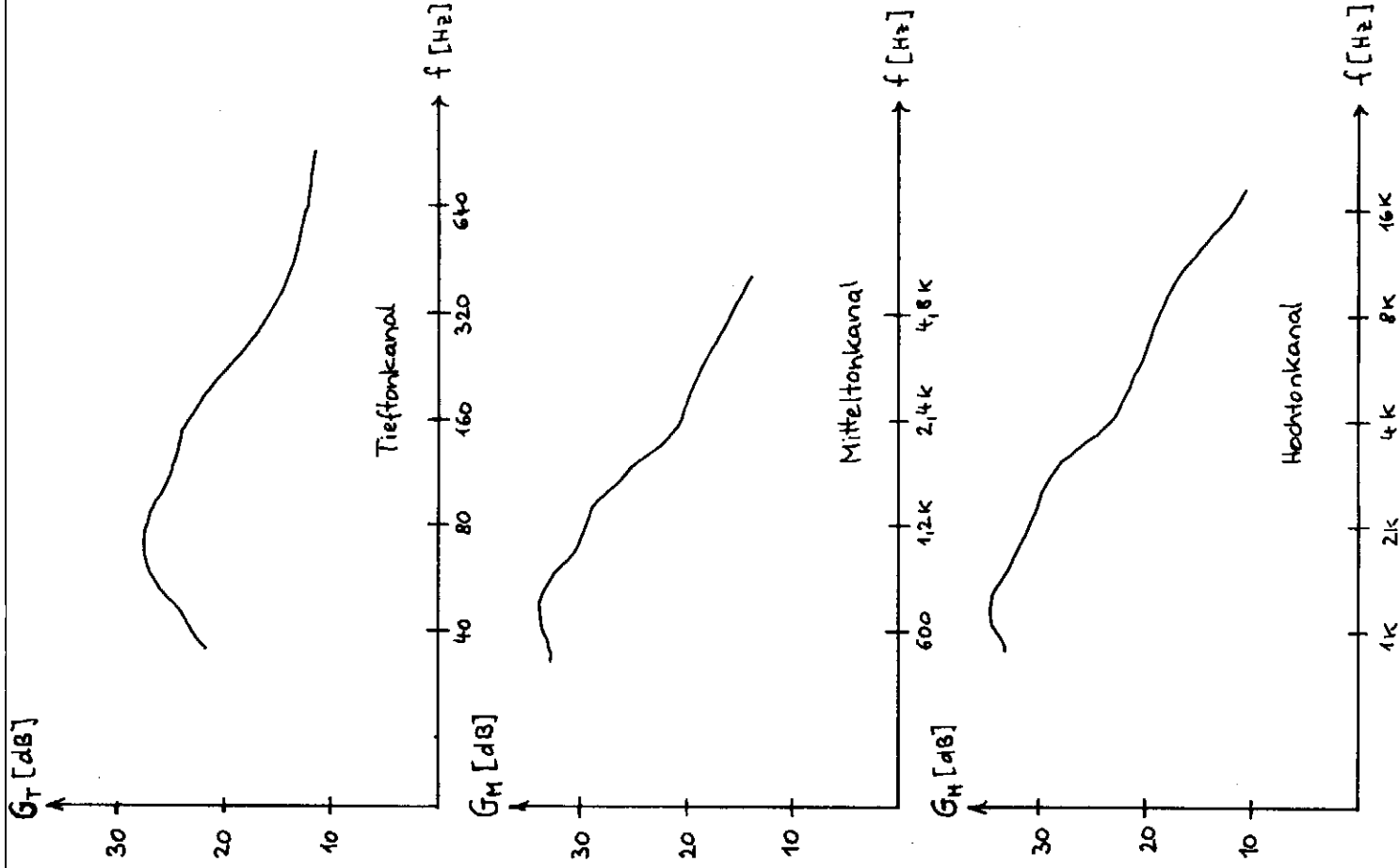
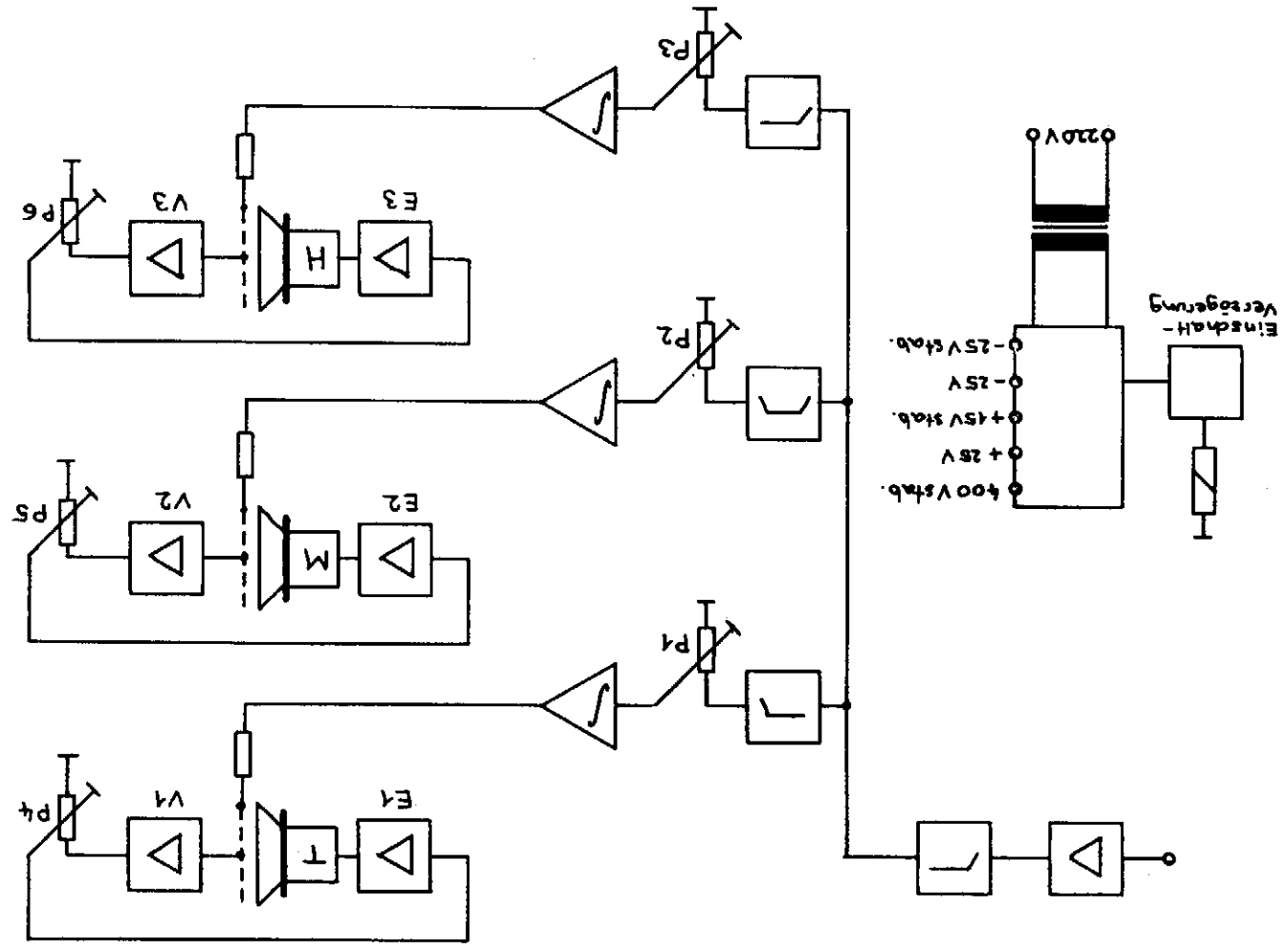


Abb. 6



Abb. 7



Vereinfachtes Blockschaltbild MONITOR 5