Aktive Lautsprecher:

Mikrofon auf der Baßmembran

Akustische Gegenkopplung verbessert die Baßwiedergabe

Mit Elektronik lassen sich Lautsprecherboxen im Klang oft wesentlich verbessern. Das Konzept des aktiven Lautsprechers setzt sich immer mehr durch.

Für den eiligen Leser

Am Beispiel einer Aktivbox schildert ein Lautsprecher-Entwickler Möglichkeiten und Vorzüge aktiver Lautsprecher. Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht dabei die akustische Gegenkopplung des Baßlautsprechers mit Hilfe eines Elektret-Mikrofons.

Auf der HiFi-Video '84 präsentierte Backes & Müller u. a. drei neue Aktivboxen. Sie bieten eine Menge technischer Finessen. So wurde z. B. der Filterauslegung und dem Phasengang besondere Aufmerksamkeit gewidmet und erstmalig die AFB-Gegenkopplung (AFB = acoustical feedback = akustische Gegenkopplung) im Baßbereich angewendet.

Vorteile mit Aktivtechnik

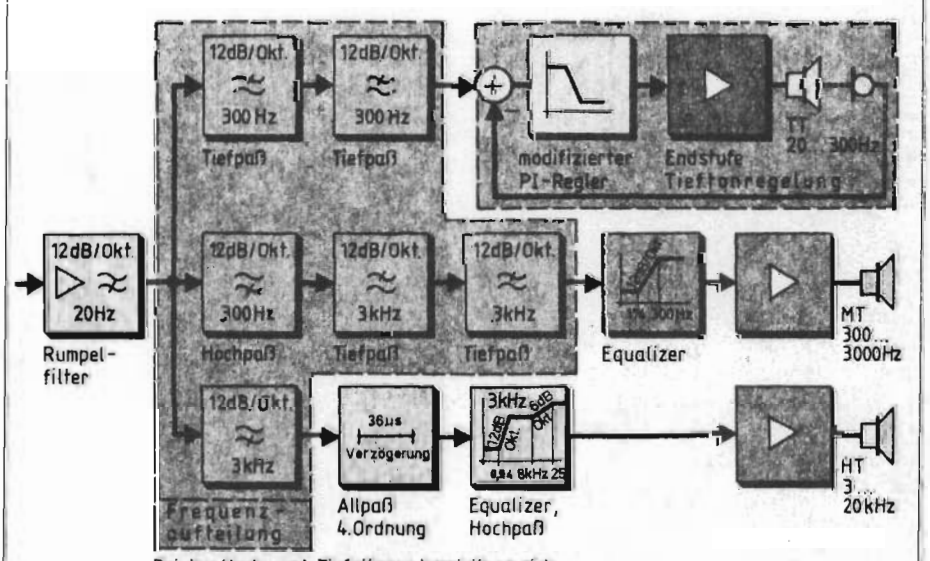
Aktivkonzepte bieten dem Lautsprecherentwickler erheblich mehr Möglichkeiten als Passivkonzepte. So lassen sich Unterschiede im Wirkungsgrad einzelner Chassis außerordentlich einfach ausgleichen. Beim Passivlautsprecher sind sie hingegen oftmals nur auf Kosten des Wirkungsgrades zu beheben.

Der niedrige Ausgangswiderstand des zugeordneten Verstärkers bedämpft ein Chassis in einer Aktivbox nahezu ideal. Bei Passivboxen „sehen" speziell die Mittel- und Hochtonlautsprecher den gemeinsamen Verstärker nur durch die äußerst komplexe Impedanz der Frequenzweiche. Die Bedämpfung der Eigenresonanz ist deshalb bei Passivboxen nicht ausreichend. Weiterhin sind Regelungen von Membranbewegungen ausschließlich Aktivboxen vorbehalten. Auch sehr steilflankige Frequenzweichen lassen sich praktisch nur in aktiver Bauweise realisieren.

Weichen verschiedener Ordnung

Um die Lautsprecherchassis nicht mit Signalspannungen außerhalb ihres Übertragungsbereiches, die sie nicht mehr verzerrungsfrei übertragen können, zu beaufschlagen, muß eine Frequenzweiche möglichst scharf trennen. Gleichzeitig wünscht man sich aber auch einen lückenlosen Übergang zwischen den einzelnen Frequenzbereichen der Lautsprecherbox.

Weichen 1. Ordnung weisen eine Steilheit von 6 dB/Oktave auf. Sie haben den Vorteil, daß sich die Ausgangssignale bei jeder Frequenz zu einem konstanten Summensignal addieren. Außerdem verfügt diese Art von Frequenzweichen über eine konstante Gruppenlaufzeit, so daß keine frequenzabhängige Phasenverschiebung des Summensignals entsteht. Deshalb suchte man nach schaltungstechnischen Lösungen, die bei größerer Steilheit ähnliche Vorteile besitzen.



① **Blockschaltbild** der aktiven Lautsprecherbox AFB-Delta von Backes & Müller mit akustischer Rückkopplung zur Steuerung des Baßlautsprechers

Weichen 2. Ordnung haben den Nachteil, daß sich die Ausgangssignale bei der Übergangsfrequenz wegen Gegenphasigkeit auslöschen und deshalb ein „Übertragungsloch" entsteht. Üblicherweise wird aus diesem Grunde ein Chassis „verpolt" angeschlossen, was den Effekt zwar beseitigt, aber zu einer Amplitudenüberhöhung bei der Grenzfrequenz führt. Außerdem ändert sich das Gruppenlaufzeitverhalten.

Für die Lautsprecher der AFB-Serie von Backer & Müller, wurde deshalb eine bereits von Linkwitz [1] vorgeschlagene aktive Weiche angewandt. Die Weiche besteht im Tief- und im Hochtonzweig aus jeweils zwei hintereinander geschalteten Butterworthfiltern 2. Ordnung, so daß sich die Filterkurven bei −6 dB schneiden, weil die beiden Ausgangssignale dort gleichphasig sind.

Das Besondere an dieser Weiche ist, daß sich die Ausgangssignale, wie bei der Weiche erster Ordnung, bei jeder Frequenz zu einem konstanten Summensignal addieren. Die Phase des Summensignals dreht sich über der Frequenz kontinuierlich von +360° auf −360°. Die Gesamtanordnung hat also Allpaßverhalten.

Die Anforderungen an die Genauigkeit der Bauteile werden mit steigendem Filtergrad höher. Diese Filter haben daher nur dann einen Sinn, wenn durch engtolerierte Bauelemente wie z. B. 1%ige Metallfilmwiderstände und 5%ige Kunststoff-Folienkondensatoren eine ausreichende Genauigkeit erreicht wird.

Der Lautsprecher, ein akustischer Hochpaß

Nach Untersuchungen von Small [2] läßt sich das Lautsprecherchassis im geschlossenen Gehäuse in guter Näherung durch ein Hochpaßverhalten 2. Ordnung beschreiben. Es ist durch die totale Systemgüte Qt *) und die Resonanzfrequenz fo gekennzeichnet.

Gewöhnlich werden Lautsprecherchassis (mit Ausnahme von Tieftönern) nur weit oberhalb ihrer Eigenresonanz betrieben, so daß der Einfluß der Chassis-Grundresonanz auf den Übernahmebereich gering bleibt.

Bringt man Qt auf 0,707 (Butterworthverhalten) und fo auf die gewünschte untere Übernahmefrequenz des Mittel- bzw. Hochtonzweigs, so kann das Frequenzgangverhalten des Lautsprecherchassis als Hochpaßverhalten 2. Ordnung mit Butterworthcharakteristik in die Frequenzweiche einbezogen werden. Somit kann ein elektrischer Hochpaß 2. Ordnung entfallen.

Ein Korrekturnetzwerk sorgt nun dafür, daß der Frequenzgang bei der gewünschten Übergangsfrequenz mit Butterworthverhalten im Sinne eines Hochpasses 2. Ordnung ausfällt. Unterhalb der Chassiseigenresonanz geht der Frequenzgang dieses Netzwerkes in konstante Verstärkung über.

Das Lautsprecherchassis mit diesem „vorgeschalteten" Equalizer wirkt nun wie ein Lautsprecher ohne Eigenresonanz, mit einem Butterworth-Hochpaß 2. Ordnung bei der gewünschten Übernahmefrequenz.

Eine Eigenschaft dieses Aktivweichen-Konzeptes ist, daß die Ausgangssignale der Lautsprecherchassis bei der Übernahmefrequenz gleichphasig sind und 6 dB unter dem normalen Pegel liegen. Die Schallanteile addieren sich auf der Hauptstrahlungsebene der Box zu einem konstanten Summensignal. Dies gilt jedoch nur dann, wenn die Chassis in derselben Abstrahlebene liegen. Um Lautsprecherchassis in die gleiche Abstrahlebene zu bringen, könnte man abgestufte Schallwände verwenden. Die Stufen führen jedoch zur Beugung an den Kanten. Sie wirken dann als Sekundärstrahler, die zu Interferenzen führen.

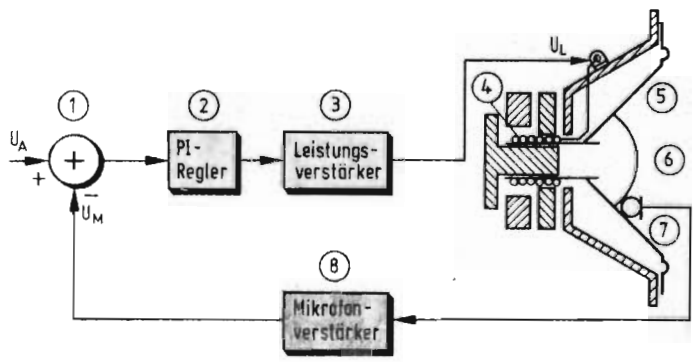
*) Qt = Güte des Lautsprecherchassis im eingebauten Zustand.

Bei den AFB-Lautsprechern wurde die mechanische Abstufung der Schallwand durch eine Laufzeitschaltung ersetzt. Die erforderlichen Laufzeiten wurden durch Allpässe erreicht. Dabei ist der Aufwand und damit der Filtergrad um so höher, je größer die Laufzeit im Verhältnis zur höchsten vorkommenden Frequenz ist. Backes & Müller entschied sich für Allpaßfilter 4. Ordnung, die bis über den Wiedergabebereich der Chassis hinaus konstante Gruppenlaufzeit ermöglichen. Bei der 25-mm-Kalotte der Dreiweg-Box beträgt die erforderliche Laufzeit 36 µs und bei dem in der Vierweg-Box verwendeten 50-mm-Kalotten-Hochmitteltonchassis 69 µs.

Die Eigeninduktivität des Lautsprecherchassis bewirkt eine Verringerung des Stromes und seine Phasennacheilung bei hohen Frequenzen. Dieser Einfluß wurde durch einen Hochpaß elektrisch kompensiert. *Bild 1* zeigt das Blockschaltbild der Gesamtanordnung am Beispiel der AFB-Delta von Backes & Müller.

Gegenkopplung verbessert die Wiedergabe

Durch Gegenkopplungen sind Verbesserungen des Frequenzganges, des Klirrverhaltens und des Impulsverhaltens von Lautspechern möglich. Dabei können zum einen Auslenkung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung der Lautsprechermembran zur Gegenkopplung herangezogen werden. Zum anderen können die Aufnehmer für diese drei Größen auf unterschiedlichste Weise



① **Prinzip** der akustischen Gegenkopplung. Das Mikrofon ist auf der Membran des Lautsprechers befestigt

ausgeführt sein: optisch, kapazitiv, induktiv, piezoelektrisch, akustisch usw. Akustische Gegenkopplungen bieten die folgenden Vorteile:

- Eine Gegenkopplung des Schalldrucks selbst ergibt direkt die gewünschte Frequenzgang-Linearität. (Im Gegensatz dazu sind bei Orts- und Geschwindigkeitsgegenkopplungen korrigierende, genau angepaßte Frequenzgangbeeinflussungen zwingend erforderlich.)

- Gegenkopplungssensoren stehen heute in Form von HiFi-Elektret-Mikrofonkapseln preisgünstig zur Verfügung. Sie erfordern nur geringen Montageaufwand und bieten gute Linearität.

Die bekannten akustischen Gegenkopplungen haben den Nachteil, daß ein Mindestabstand des Mikrofons von der Membran eingehalten werden muß, damit ein Anschlagen der Membran am Mikrofon sicher verhindert wird. Die damit verbundenen Schall-Laufzeiten (Totzeiten) ergeben eine mangelhafte Stabilität des Regelkreises im höheren Frequenzgebiet. Ferner sind Störgeräusche unvermeidlich, da unmittelbar vor der Membran starke Luftströmungen auftreten. Außerdem führt der sich ständig ändernde Abstand zwischen Mikrofon und Membran zu Amplituden- und Intermodulationsverzerrungen.

Bei den AFB-Lautsprechern werden diese Nachteile dadurch vermindert, daß das Mikrofon direkt auf die Lautsprechermembran geklebt ist, sich also bei der Schallabstrahlung mit der Membran mitbewegt. Die Elektret-Mikrofonkapseln in den AFB-Lautsprechern wiegen z. B. nur ca. 0,30 g.

AFB-Regelung in der Praxis

Das Prinzip der AFB-Regelung ist in *Bild 2* dargestellt: An der Schwingspule ④ des Lautsprecherchassis, liegt die Wechselspannung U_L und treibt die Membran ⑤ mit der Staubschutzkalotte ⑥ an. Das z. B. am Rand der Staubschutzkalotte befestigte Mikrofon ⑦ liefert eine zum Schalldruck proportionale Spannung, die der Mikrofonverstärker ⑧ auf U_M verstärkt. U_M wird an der Summierstelle ① im Sinne einer Gegenkopplung zum Ansteuersignal U_A addiert. Die Summenspannung wird über den PI-Regler ② und den Leistungsverstärker ③ als U_L dem Lautsprecher zugeführt.

Bei einem Lautsprecherchassis treten grundsätzlich in Abhängigkeit von der Frequenz mehr oder weniger große Phasendrehungen zwischen U_L und dem produzierten Schalldruck auf.

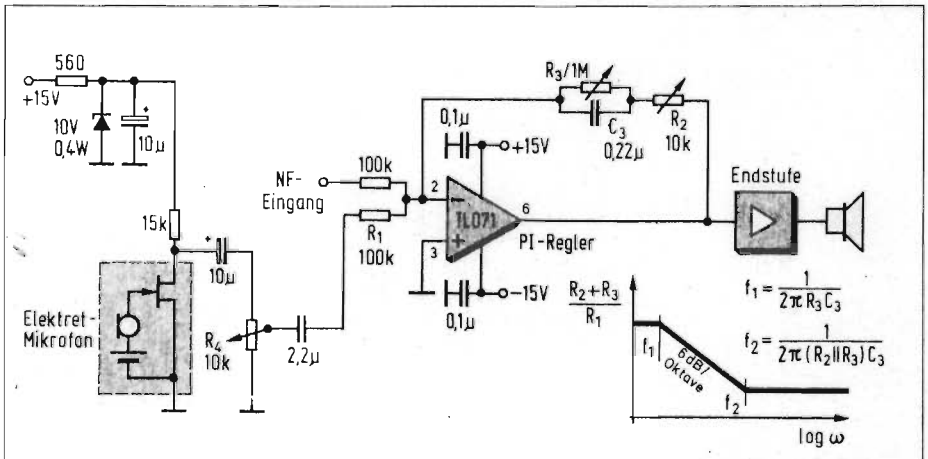
Optimiert man den Regelkreis derart, daß in der Mitte des Übertragungsbereiches optimale Stabilität vorliegt, kommt es am unteren Ende und am oberen Ende des Übertragungsbereiches im allgemeinen zu Schwingneigung. Diese läßt sich mit den üblichen Methoden der Regelungstechnik beherrschen. Kernstück dazu ist der PI-Regler. Er ruft eine Anhebung der tiefen Frequenzen hervor, die den Phasengang derart beeinflussen, daß die Schwingneigung erheblich reduziert wird. Die Tiefenanhebung wird bei extrem tiefen Frequenzen begrenzt (Gegenhalt).

Im Effekt sorgt die beschriebene Regelschleife dafür, daß U_A und U_M möglichst gut übereinstimmen und somit der erzeugte Schalldruck möglichst gut mit der Ansteuerspannung U_A übereinstimmt.

Eine für Gegenkopplungsexperimente geeignete Schaltung zeigt *Bild 3*. Mit der Zenerdiode wird die Versorgungsspannung auf 10 V stabilisiert. Das Elektretmikrofon (z. B. Typ MCE 2000) ist mit einem Arbeitswiderstand von 15 kΩ versehen. Mit R4 läßt sich der Rückkopplungsfaktor einstellen. An Pin 2 des IC TL071 werden die Mikrofonspannung und die NF-Eingangsspannung über je 100 kΩ zugeführt. R2, R3 und C3 rufen den im Diagramm angedeuteten Frequenzgang (bei offenem Regelkreis!) hervor, der das Phasenverhalten optimiert. Die Eckfrequenzen f1 und f2 ergeben sich nach den angegebenen Formeln.

Zum Abgleich werden R2 und R3 auf Mitte und R4 auf Minimum gestellt. Dann wird R4 aufgedreht bis Instabilitäten auftreten und von hier aus zurückgedreht, bis die Instabilitäten sicher verschwunden sind. Die optimalen Werte von R2 und R3 hängen von Chassis, Boxengröße usw. ab und müssen versuchsweise ermittelt werden. Kann keine Stabilität erzielt werden, dann ist das Lautsprecherchassis verpolt (Mitkopplung).

Der Ort für das Mikrofon ist so zu wählen, daß die abgegebene Mikrofonspannung möglichst gut mit dem Schalldruck im Fernfeld übeeinstimmt. Wird das Mikrofon direkt auf der Membran befestigt, sollten Elektretfolie und Lautsprechermembran senkrecht zueinander stehen, damit kein Körperschall aufgenommen wird. Dr. Potthoff/Böckel



③ **Schaltungsvorschlag** für eine akustische Gegenkopplung in einer aktiven Lautsprecherbox

Literatur:

[1] *Siegfried Linkwitz:* Loudspeaker System Design; Wireless World May 1978, June 1978 und Dec. 1978.

[2] *Richard H. Small:* Closed Box Loudspeaker Systems; Journal of the Audio Engineering Society; Part 1. Analysis Dec. 1972 vol. 20, No. 10; Part 2. Synthesis Jan./Feb. 1973 vol. 21, No. 1.