

BASSGEGENKOPPLUNG

Ohne das Prinzip der Gegenkopplung wäre die heutige Elektronik nicht denkbar. Auch bei Lautsprechern hat dieses Prinzip wegen der unumstrittenen Vorteile Einzug gehalten. Leider sind solche Lautsprecher aufgrund des mechanischen und elektrischen Mehraufwandes noch sehr teuer. Aber es geht auch anders

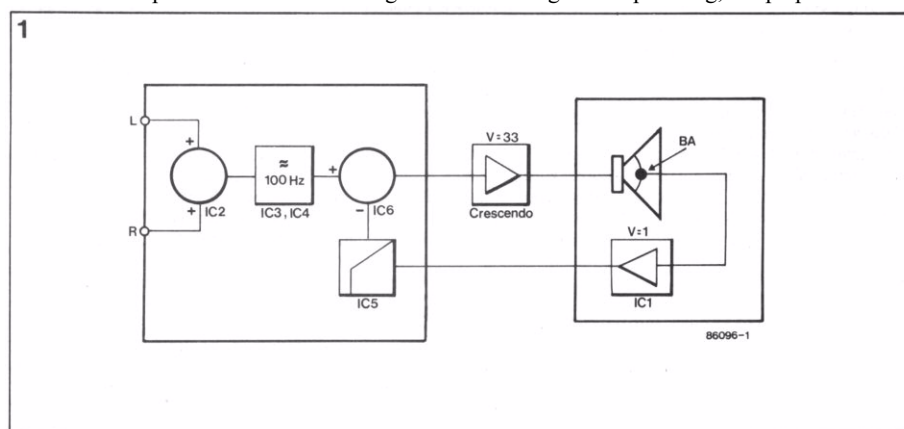
Mit LötKolben und Skalpell

Hier wird ein gegengekoppelter Baßlautsprecher beschrieben, der einen Vergleich mit Industrieprodukten nicht scheuen braucht. Dieser Baßlautsprecher kann als Subwoofer oder als Baß-Chassis in einer 3- oder 4-Weg-Box eingesetzt werden. Seit Thiele und Small ihre Lautsprecher-Theorie veröffentlichten, gelten Lautsprecher-Systeme nicht mehr als unbekannte Wesen. Boxen seriöser Hersteller werden nicht mehr nach der Methode „Versuch und Irrtum“ entwickelt, sondern berechnet und dann gehörmäßig abgestimmt. Geschlossene Boxen besitzen nach R. Small eine Übertragungsfunktion wie ein Filter 2. Ordnung. Bassreflex- und Transmissionline-Lautsprecher entsprechen Filtern 4.-6. Ordnung. Aufgrund dieses prinzipiellen Unterschieds wurde hier als Ausgangsbasis für eine Lautsprecher-Regelung ein Lautsprecher im geschlossenen Gehäuse gewählt. Ein Filter wird durch die Güte Q und die Resonanzfrequenz f bestimmt. Gleiches gilt auch für ein Lautsprechersystem, hier heißen die Größen Q_{tc} (t für total, c für closed box) und f_c . An ein ideales, universelles Baßlautsprecher-System werden folgende Forderungen gestellt:
 $Q_{tc} = 0,5 - 0,7$ / $f_c < 30 \text{ Hz}$ / Gehäusevolumen $< 100 \text{ L}$ / obere Grenzfrequenz $> 300 \text{ Hz}$ / Klirrfaktor $< 1\%$
Ein passiver Lautsprecher ist nicht in der Lage, alle Forderungen zu erfüllen. Besonders bei Q_{tc} und f_c werden Kompromisse eingegangen. Aktive Lautsprecher-Systeme bieten schon mehr Möglichkeiten, dem Ideal näherzukommen. „Feedforward-Module“ und Frequenzgangentzerrung wie beim „PrestoSubwoofer“ sind erste Versuche dafür. In der Elektrotechnik fällt dieses Schaltprinzip unter den Begriff „Steuerung“. Grundsätzlich besser sind geregelte Systeme, die aber leider nur zu häufig zu Schwingungen neigen. An einem konkreten Beispiel beschreibt dieser Artikel die Schwierigkeiten und natürlich die Lösungen einer Lautsprecher-Gegenkopplung und vergleicht zum Schluß das ungerегelte mit dem geregelten Lautsprecher-System.

Blockschaltbild

Eine solche Regelung erreichen wir durch die Gegenkopplung eines vom Schalldruck abhängigen Signals auf den Eingang der Schaltung. Hier wird das Gegenkopplungssignal mit dem Eingangssignal verglichen, und bei Abweichungen wird der Lautsprecher entsprechend nachgeregelt. Zur Gewinnung des Gegenkopplungssignals verwenden wir einen massearmen Beschleunigungsaufnehmer, der an der Lautsprechermembran befestigt wird. Er erzeugt eine Spannung, die proportional zur Membranbeschleunigung und damit zum Schalldruck ist. Dieses Signal wird über einen Regelverstärker auf den Eingang zurückgekoppelt. Damit erhalten wir das Blockschaltbild in Bild 1.

Bild 1. Blockschaltbild der Baßregelung mit modifiziertem Chassis.



Der erste Block entspricht der Schaltung in Bild 3 und wird noch ausführlicher erklärt. Es folgt ein Endverstärker, der nur die Bedingung von $U_1/U_e = V = 33$ erfüllen muß. Eine höhere Verstärkung vergrößert auch die Schwingungsneigung. Eine Verkleinerung stellt aber wieder die richtigen Verhältnisse her. Die Leistung des Mini-Crescendos stellt wohl die untere Grenze dar, nach oben wird die Leistung nur durch die maximale Lautsprecher-Leistung begrenzt.

Der Lautsprecher (LS), der Beschleunigungsaufnehmer (BA) und der Impedanzwandler (IW) befinden sich im Boxengehäuse. Auf die Auswahl des Lautsprechers und Beschleunigungsaufnehmers und auf die notwendigen mechanischen Modifikationen wird in einem gesonderten Abschnitt eingegangen.

Schaltung

Zum Experimentieren bauen Sie am besten die Schaltung nach Bild 3 auf. IC2 ist ein einfacher Eingangsaddierer, der aus dem rechten und linken Kanal ein Monosignal erzeugt. Das folgende Tiefpaßfilter, aufgebaut mit IC3 und IC4, fand schon öfters in Elektor Verwendung. Mit IC5 ist der Regelverstärker aufgebaut. Die Dimensionierung der Bauteile R9, C9 und R11 bestimmen wesentlich das Übertragungsverhalten des gesamten Lautsprecher-Systems. Auf die richtige Dimensionierung wird später im

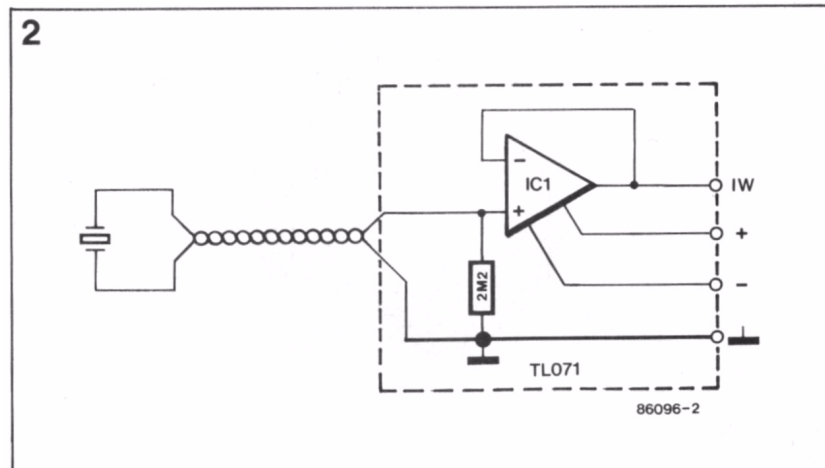


Bild 2. Der Impedanzwandler wird am Lautsprecher-Korb befestigt.

Kapitel Abgleich eingegangen. Den Additionspunkt im Blockschaltbild bildet IC6. Etwas merkwürdig können einem die zwei Tiefpässe mit R16/C11 und R17/C12 erscheinen. Sie dienen dazu, die Schwingneigung zu unterdrücken und sind unbedingt notwendig. Wer es sich zutraut, kann auch den Impedanzwandler IC7 weglassen und die zwei Tiefpässe unter Berücksichtigung des Eingangswiderstandes des Endverstärkers neu berechnen.

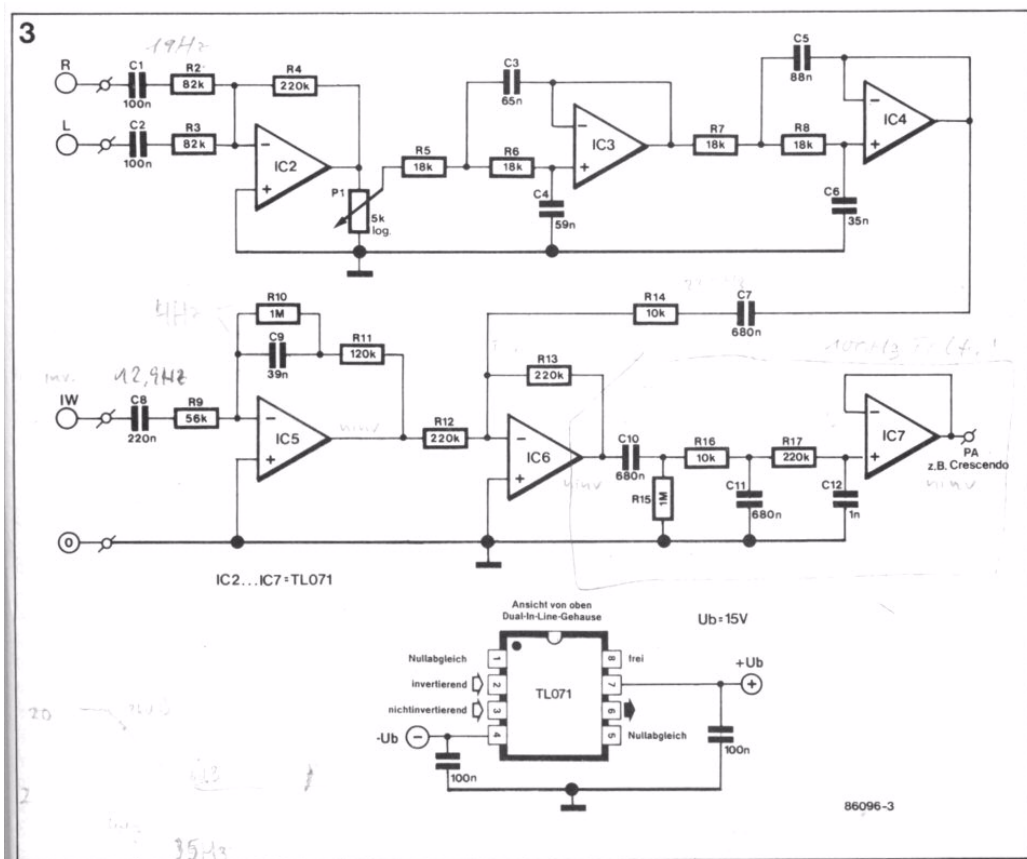


Bild 3. Das Subwoofer-Filter zur Abtrennung des Signals für die Baßendstufe.

Modifikationen am Lautsprecher

Bisher beschränkte sich der Nachbau des gegengekoppelten Lautsprechers auf einfache Lötarbeiten, welche dem Elektroniker bereits vertraut sind. Aber auch die mechanischen Änderungen am Lautsprecher sind nicht schwierig auszuführen.

Foto 1. Im Prinzip ist jeder Piezo-Hochtöner geeignet. Wir haben den AD220OPT von Valvo genommen. Hier ist der ausgebaute Piezo-Kristall zu erkennen.

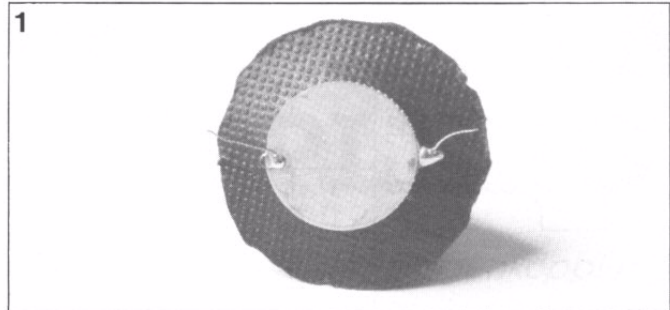


Foto 2. So wird die Kalotte vom Basslautsprecher entfernt.

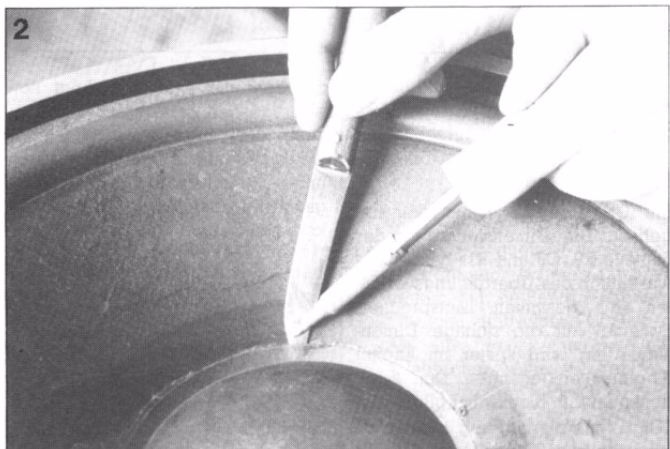


Foto 3. Die Kalotte wird mit einer Schicht Epoxid stabilisiert und der Piezo-Kristall wird im gleichen Arbeitsgang aufgeklebt.

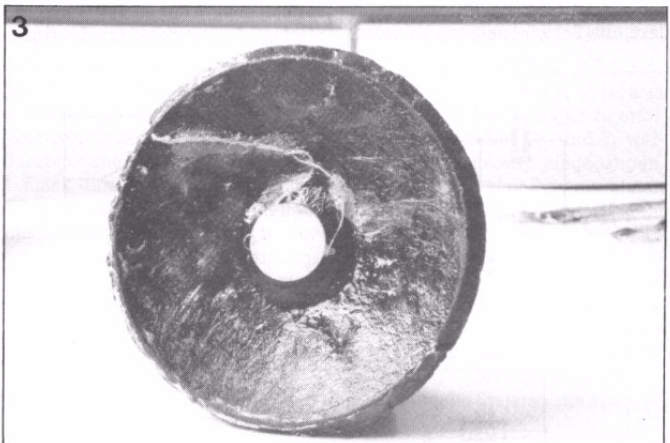


Foto 4. Hier sehen Sie das modifizierte Chassis mit angebautem Impedanzwandler.



Wenn Sie über einen Wobbelgenerator, ein Millivoltmeter, einen Phasemesser, einen X-Y-Schreiber und über Zeit verfügen und sich in der Gegenkopplungstheorie auskennen, können Sie auch jeden anderen Baß-Lautsprecher für diese Gegenkopplung benutzen. Ansonsten verwenden Sie bitte den PSL 320/400 von Isophon. Zum Zeitpunkt der Entwicklung dieser Gegenkopplung war dieser Lautsprecher sehr preisgünstig und lieferte den größten Schalldruck bei tiefen Frequenzen im Vergleich zu den entsprechenden Audax-, Dynaudio-, Peerless und Scan-Speak-Chassis. Außerdem zeigte sich, daß er mechanisch extrem robust ist.

Einen einfachen Beschleunigungsaufnehmer findet man in jedem Piezo-HT. Mit einem scharfen Messer oder besser einem Skalpell wird die Membran am Rande ausgeschnitten. Die Anschlußdrähte werden jetzt an der Lötöse (nicht am Kristall) abgelötet oder abgekniffen. Wenn Sie nun die ca. 40 mm große Membran auf die Größe des Piezo-Plättchens zurechtschneiden, haben Sie den fertigen Beschleunigungsaufnehmer (Foto 1).

Bevor Sie sich an den Einbau in den Lautsprecher begeben, sollten Sie alle Arbeitsmaterialien vorher zurechtlegen, denn der Lautsprecher sollte nur so kurz wie möglich geöffnet sein. Es besteht die Gefahr, daß sich im Luftspalt Schmutz ansammelt. Für die weitere Vorgehensweise gibt es zwei Möglichkeiten: Sie können den Piezo bzw. die HT-Membran auf die Kalotte des PSL 320/400 oder dahinter kleben. Beide Möglichkeiten sind gleichwertig, wenn Sie eine Lautsprecherabdeckung benutzen. Die Befestigung hinter der Kalotte ist allerdings optisch ansprechender und bietet mehr Schutz. Aus diesen Gründen soll sie hier erklärt werden. Die Kalotte ist mit Heißkleber fixiert und kann mit Wärme leicht gelöst werden. Dazu setzen Sie den LötKolben ans Messer (siehe Foto 2) und schieben das Messer zwischen Membran und Kalotte. Das heiße Messer kann leicht eindringen und die Verbindung lösen. Unter leichtem Heben und Senken werden das Messer und der LötKolben einmal rund geführt. Die Verbindung Membran-Kalotte ist damit bereits fast gelöst. Mit einem leichten Ruck können Sie die Kalotte anschließend ganz lösen. Am besten legen Sie nun den Lautsprecher (Magnet nach oben) beiseite. Der Luftspalt ist so vor Schmutz geschützt.

Bevor der Beschleunigungsaufnehmer montiert wird, muß noch die Kalotte stabilisiert werden. Dazu genügt eine Schicht Epoxydharz mit Glasfasermatte. Im gleichen Arbeitsgang wird die Membran des Piezo-Hochtöners aufgeklebt (Foto 3). Nach einer kurzen Trockenzeit können Sie zwei hochflexible Litzen an die kurzen Drähte des Piezo-Kristalls löten. Diese Drähte müssen auch an die Kalotte geklebt werden, damit später bei den Bewegungen der Lautsprechermembran nichts klappert.

Zum Befestigen der Kalotte ist eigentlich jeder Haushaltskleber, wie Uhu, Pattex o.ä. geeignet. Die Verwendung eines Heißklebers bietet allerdings den Vorteil, daß er in der oben beschriebenen Weise wieder gelöst werden kann. Bevor die Kalotte eingesetzt wird, muß ein kleines Loch in die Membran gestochen werden, durch welches die Anschlußdrähte geführt werden. Diese beiden Drähte werden ähnlich wie die Schwingspulendrähte an der Membraninnenseite befestigt und zur Platine des Impedanzwandlers geführt. Eine ungünstige Befestigung der Drähte führt auch hier zum Klappern während der Musikwiedergabe und kann noch korrigiert werden.

Auf Foto 4 können Sie ein modifiziertes Chassis einschließlich Impedanzwandler sehen.

Abgleich

Den erfolgreichen Einbau des Beschleunigungsaufnehmers können Sie testen, indem Sie an die Anschlußdrähte des Piezos ein Signal legen. Der Piezo gibt jetzt irgendwelche Geräusche von sich. Der nächste Schritt besteht darin, die Teile gemäß Bild 1 anzuschließen und R11 und C9 kurzzuschließen (am besten mit einem Schalter). Die Regelung ist nicht in Betrieb, und die Schaltung kann eingeschaltet werden. Wenn Sie den Schalter nun kurz öffnen, gibt es drei Möglichkeiten:

1. Es kommt kein Ton aus dem Lautsprecher:
2. Der Lautsprecher schwingt auf tiefen Frequenzen (< 100 Hz).
3. Der Lautsprecher schwingt auf hohen Frequenzen (> 1 kHz).

Im ersten Fall funktioniert der gegengekoppelte Lautsprecher ordnungsgemäß, und ein Abgleich erübrigt sich. Das ist der Normalfall. Wenn Fall Zwei eintritt, ist der Piezo falsch angeschlossen. Hier hilft ein Vertauschen der beiden Anschlußdrähte am Eingang des Impedanzwandlers.

Es ist möglich, daß durch Lautsprechertoleranzen und verschiedene Klebungen des Piezo der Fall 3 eintritt. Durch ein Verringern der Gegenkopplung läßt sich diese Schwingneigung beseitigen. Es empfiehlt sich, zuerst C12 zu vergrößern (bis 1,8 nF), dann C11 (bis 1 μ F). Falls diese Veränderungen noch nicht zum erwünschten Erfolg führen, sollte R11 verkleinert werden und/oder C9 vergrößert werden. R11 verschiebt die untere Grenzfrequenz f_c nach oben und C9 verschlechtert etwas die Güte Qtc.

Dieser gegengekoppelte Lautsprecher wurde allerdings schon mehrmals nachgebaut. Bisher sind keine Probleme mit den Schwingungen bekannt geworden. Das Lautsprechersystem schwingt natürlich immer mit der vollen Leistung des verwendeten Verstärkers, und erst bei Verstärkern mit einer Leistung von über 200 W empfiehlt es sich, mit kleinerer Leistung zu testen.

Meßergebnisse

Erst die Meßergebnisse und ein Hörtest zeigen, ob sich der Aufwand gelohnt hat. Die Messungen 1-3 und Bild 4 zeigen die hervorragende Qualität des gegengekoppelten Lautsprechers. Diese Ergebnisse sind nur mit kritischem Verstand mit den

Meßergebnissen der Lautsprecherhersteller zu vergleichen, denn die Meßpraxis hat gezeigt, daß die veröffentlichten Daten eher dem Wunschdenken als der Realität entsprechen.

Bis zu diesem Zeitpunkt war der gegengekoppelte Lautsprecher nichts anderes als Gestalt gewordene Theorie, wobei alle Messungen noch nichts über die Qualität eines Systems aussagten. Erst ein Hörtest konnte weitere Aufschlüsse bringen. Also wurde ein 25.000 DM teurer Referenz-Lautsprecher (Backes & Müller) beschafft, und es wurde zu einem Hörtest eingeladen. Alle „Freaks“ waren der Ansicht, daß dieser gegengekoppelte Lautsprecher im Tieftonbereich dem Referenzsystem in nichts nachstand. Diese relativ einfache Modifikation an einem Baßlautsprecher gibt die Möglichkeit, ein System zu schaffen, welches an das theoretisch Machbare nahe herankommt.

Tabelle 1. Messungen.

Messung 1: Klirrfaktor bei 96 dB Schalldruck

Messung 2: Max. Schalldruck bei 40 Hz in Abhängigkeit vom Gehäusevolumen.

Messung 3: Lautsprecher-Parameter in 70-Liter-Gehäuse.

Tabelle 1. Messungen

Messung 1

| f | 30 Hz | 40 Hz | 70 Hz | 100 Hz |
|---------|-------|-------|-------|--------|
| ohne GK | 4,5% | 1,7% | 0,65% | 0,85% |
| mit GK | 1,5% | 0,6% | 0,5% | 0,65% |

Messung 2

| Volumen | 50 l | 70 l | 100 l |
|---------|--------|--------|--------|
| ohne GK | 98 dB | 100 dB | 102 dB |
| mit GK | 101 dB | 103 dB | 105 dB |

Messung 3

| | Q_{tc} | f_c | f_3 dB |
|---------------------------|----------|-------|----------|
| ohne GK | 1,9 | 48 Hz | 29 Hz |
| mit GK | 0,6 | 17 Hz | 20 Hz |
| mit GK und Subsonikfilter | 0,5 | 20 Hz | 25 Hz |

Bild 4: Nahfeldmessung des Lautsprechersystems mit und ohne Gegenkopplung, ohne EingangsfILTER.

