

Der Audio-Verstärker

Wichtiges Bindeglied zwischen dem Musiksinal und dem Lautsprecher.

Welches von den für die hochwertige Musikwiedergabe benötigten Geräten/Teile das Wichtigste ist, darüber lässt sich trefflich streiten. Wir möchten da nicht mitstreiten, sondern darlegen, was ein Verstärker zu leisten hat und wie viel Einfluss die Schaltungstechnik auf die verlustfreie Wiedergabe hat.

Im Gegensatz zu einem Vorverstärker und Signalquellen muss der Leistungsverstärker nicht nur das Signal perfekt verstärken, sondern auch entsprechende Leistung frequenzunabhängig an den Lautsprecher bringen. Diese Leistung darf im Frequenzbereich 20Hz-20kHz keinerlei Einschränkungen haben. Nimmt man den typischen Wert von -3dB zur Hand, sollte die Bandbreite eines Verstärkers zumindest jeweils 3 Oktaven über die Bandbreite des Musiksinals hinausgehen. Im unteren Bereich deshalb $20\text{Hz}/2/2/2 = 2,5\text{Hz}$ und im oberen Bereich analog $20\text{kHz} * 2 * 2 * 2 = 160\text{kHz}$. Nur wenn ein Verstärker diese Bandbreite einhält, kann das Musiksinal verlustfrei weitergegeben werden.

Welche Verstärkertechnologie?

Wir differenzieren zwischen drei Technologien bezogen auf die Bauteile und Systeme: (1) Bipolartransistor oder MOSFET in Class A/AB, (2) Elektronenröhre und (3) Schaltverstärker (Class D).

Zwischen Transistorverstärkern in Bipolar- bzw. in MOSFET-Technik sehen wir keinen signifikanten Unterschied bzw. Vor- oder Nachteil. Hier entscheidet alleine die Qualität des gesamten Schaltungskonzepts: Eingangsstufe – Treiber – Leistungsstufe – Rückkopplungsschleife. Sind diese vier Elemente optimal auf die Bauteile (egal, ob in Bipolar- oder MOSFET-Technik) abgestimmt, sollten keine relevanten Qualitätsunterschiede vorhanden sein.

Die Verstärkerröhre hat gute Voraussetzungen für eine hohe Qualität. Die Signalqualität bei sehr guten

Konzepten ist hervorragend. Ein Vorteil von Röhren ist, dass diese nach einer Übersteuerung ohne Erholzeit in den Normalbetrieb übergehen. Eine Einschränkung ergibt sich beim Röhrenverstärker durch den erforderlichen Ausgangsübertrager. Trotz der hohen Qualität der Ausgangsübertrager gibt es eine Begrenzung des unteren und oberen Frequenzbandes. Darüber hinaus wird die Anstiegszeit am Ausgang ebenso begrenzt. Ein weiterer Nachteil ist die Ausgangsimpedanz des Röhrenverstärkers (bei der meistens verwendeten Ultralinear-schaltung sind Werte $>300\text{m}\Omega$ zu erwarten). Der Röhrenverstärker übergibt ein hervorragendes Signal an den Lautsprecher, übt aber keine Kontrolle über diesen aus. Je nach Lautsprecher ist somit ein unterschiedlich klangliches Ergebnis vorhanden. Es gibt auch Röhrenverstärker in Gegentakt-Parallel-Schaltung ohne Ausgangsübertrager (PPP/OTL = Parallel Push-Pull / Output-Transformer-Less). Dabei werden viele/einige Röhren parallel geschaltet und dadurch kann auf den Ausgangsübertrager verzichtet werden oder zumindest ein erheblich vereinfachter Ausgangsübertrager (Spartransformator) eingesetzt werden. Mit dieser Technik ergibt sich im Vergleich zur weit verbreiteten Ultralinear-schaltung eine für Röhrenverstärker vergleichsweise geringe Ausgangsimpedanz von etwa $100\text{m}\Omega$. Wie auch bei der Betrachtung der Bipolar- oder MOSFET-Technik ist nicht die verwendete Technologie für einen sehr guten Klang entscheidend, sondern die präzise und gelungene Ausführung der jeweiligen Schaltung.

Schaltverstärker (Class D) drängen immer mehr auf den Markt. Wir verfolgen diese Entwicklung mit Interesse: Bislang haben wir keine Class-D-Endstufe gehört, die klanglich im Mittel-/Hochtonbereich mit exzellenten Analogendstufen (Class AB) mithalten kann.

Bei dieser Class-D Technik ist durch die notwendige Schaltfrequenz ein Tiefpass-Filter am Ausgang notwendig. Dieser bewirkt eine Bandbegrenzung der oberen Frequenzen. Auch ein Schaltverstärker kommt nicht ohne Rückkopplung (Gegenkopplung) aus. Diese immer notwendige Kontrolle (später dazu mehr) im Schaltungsgefüge eines Verstärkers bei Schaltverstärkern noch nicht die Qualität erreicht, wie sie bei analogen Verstärkern bereits perfekt möglich ist. Wer beispielsweise seine Lautsprecher mit Bi-Amping betreiben möchte, kann schon heute ohne Einschränkung einen Schaltverstärker für den Bass verwenden. Für den Mittel-/Hochtonbereich ist jedoch ein analoger Verstärker vorzuziehen, Schaltverstärker haben hier noch Potenzial nach oben.

Wie sollte der ideale Verstärker aufgebaut sein, welche Parameter muss er erfüllen, damit das Musiksinal unbeeinflusst verstärkt, nichts weggelassen und auch nichts hinzugefügt wird? Beginnen wir mit der Stromversorgung. Ein Netzfilter am Eingang ist heute nahezu ein Muss, ebenso ein Einschaltstrombegrenzer, welcher sowohl die Haussicherung wie auch die Gerätesicherung schützt. Ein Ringkerntrafo ist wegen des geringeren Streufelds einem M-Kern vorzuziehen. Für Neuentwicklungen ist ein Schaltnetzteil eine nähere Betrachtung wert – nicht zuletzt wegen des geringeren Gewichts und der kompakten Bauweise. Wichtig: Der Schutzleiter und die Masse des Netzteils müssen getrennt sein, um Brummschleifen zu vermeiden.

Oft sind Verstärker mit „Überkapazitäten“ ausgestattet. Dabei gibt es, obwohl oft behauptet, keinen Klanggewinn, eher wird das Gegenteil erreicht. Maximale Verstärkerleistung, Nennleistung des Trafos und die Kapazität der Ladekondensatoren müssen in einem passenden Verhältnis zueinander stehen. Ist dies nicht der Fall, sind Störungen in der Spannungsversorgung zu erwarten. In einem guten Netzteil muss „Ruhe“ herrschen, keine Spikes oder Oberwellen dürfen vorhanden sein. Dieser sehr wichtige Aspekt wird oft übersehen.

Der Aufbau des Gehäuses, das Material und die Anordnung im Gehäuse tragen zum perfekten Ergebnis bei. Wir bevorzugen komplett

geschlossene Gehäuse aus Edelstahl. Die benötigten Kühlkörper sind außerhalb angebracht. Für die Abführung der Wärme werden somit keinerlei Öffnungen am Gehäuse benötigt. So wird das Eindringen von Schmutz vermieden und eine gute Abschirmung ermöglicht. Edelstahl hat eine deutlich bessere Abschirmwirkung als Alu und ist im Vergleich zu Stahl nicht oder fast nicht magnetisch (hängt vom verwendeten Edelstahl ab). Im Gerät müssen Primär-Komponenten soweit wie möglich auf Abstand zu der Verstärker-Sektion eingebaut sein. Ein- und Ausgänge sind mit kürzesten Kabelverbindungen zu versehen. Es sollte, wenn es die Schaltungstechnologie erlaubt, auf Ausgangsrelais verzichtet werden, denn diese können sich als Klangkiller erweisen. Der Verstärker benötigt dann eine Schutzschaltung, welche DC-Offset, Überlast und Weiteres überwacht und das Gerät im Störfall vom Netz trennt.

Rückkopplung/Gegenkopplung!

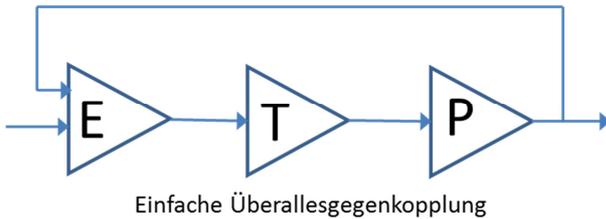
Dies ist ein immer wiederkehrendes Thema, bei dem manche Leute behaupten, dass man Rückkopplung (Gegenkopplung) nicht benötigt. Vorab, grundsätzlich sind nicht lineare Bauteile erforderlich - egal ob Transistor oder Röhre, um eine Verstärkung zu erreichen. Nur mit einer Rückkopplung (Gegenkopplung) können Verzerrungen der Verstärkerschaltung zuverlässig unter Kontrolle gehalten und nahezu ausgeschlossen werden. Wer also glaubt, mit einem Verstärker ohne Rückkopplung würde er die Musik so hören, wie diese aufgenommen wurde, erliegt einem Trugschluss.

Rückkopplung ist nicht gleich Rückkopplung. Wir kennen Spannungs- und Strom-Rückkopplung. Welche Art soll nun verwendet werden? Beide, wenn es richtig gut werden soll.

Grafik1 zeigt eine einfache Überallesgegenkopplung. Es gibt auch die Meinung, dass wenn schon Rückkopplung, dann nur innerhalb der einzelnen Stufen, wie Eingangs- Treiber- oder Ausgangsstufe, vgl. **Grafik2**. Hier wird die Überalles-Rückkopplung wie ein Fluch betrachtet.

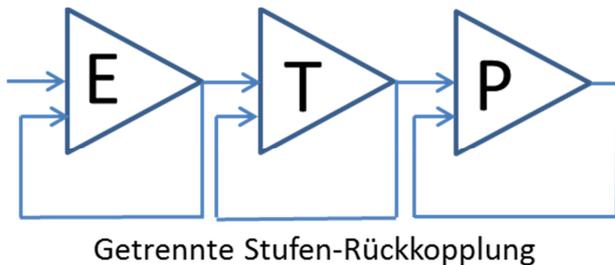
Grafik1

Rückkopplungs-Varianten
E= Eingangsstufe
T= Treiberstufe
P= Powerstufe



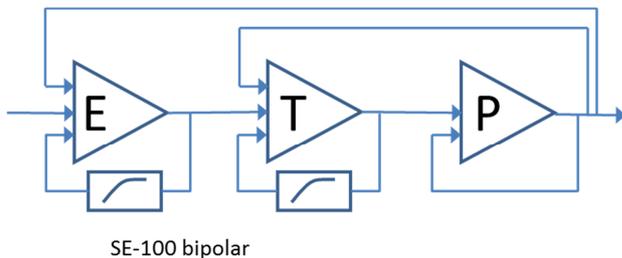
Wenn schon die getrennte Rückkopplung gewählt wird, dann sollte diese moderat ausgeführt und mit einer ebenso moderaten Über-alles-Rückkopplung kombiniert werden.

Grafik2



Dies dürfte der bessere Weg sein, vgl. **Grafik3**. Aber es gibt noch raffiniertere Varianten. Das sind verteilte Rückkopplungsschleifen und das i-Tüpfelchen sind „geschachtelte, sich ergänzende Rückkopplungsschleifen“.

Grafik3



Damit bekommt man Ergebnisse, die deutlich über den gebräuchlichen Schaltungstechniken liegen. Um diese Ergebnisse zu erreichen, sind mathematische Modelle und Simulationen erforderlich, um solch einen Verstärker methodisch entwickeln und aufbauen zu können.

Nun kommen wir zu den Daten, welche ein (nahezu) idealer Verstärker einhalten sollte, damit die Musik unverfälscht übertragen wird:

- Frequenzgang DC - >160kHz -3dB
- Dämpfung >800@8Ohm =Innenwiderstand <10mOhm, 20Hz-20kHz
- Klirrfaktor <0,1% über den ganzen Frequenzbereich.
- Weitestgehend frei von Intermodulation.
- Der Verstärker soll mit allen möglichen Belastungsarten, wie hoher Strombedarf im Bass und gleichzeitiger kapazitiver Last in den Höhen, problemlos zurechtkommen.

RMS Audio hat mit dem Modell **SE-100** solch eine Endstufe entwickelt, die diese Vorgaben alle erfüllt. Über und mit den eigenen elektrostatischen Wandlern konnte dies überprüft werden. Als Beleg folgen unten einige Messergebnisse.

Rolf Dörrmann & Michael Ludwig

Die Messungen am Scope der **RMS SE-100** zeugen von einer hervorragenden Übereinstimmung von Generatorsignal und Verstärkerausgang. Die kleinere Amplitude ist jeweils das Generatorsignal. Würde man die beiden Signale auf gleiche Amplitude setzen, dann ist kein Unterschied mehr zu erkennen. Wir messen bewusst mit Dreiecksignal statt Sinus. Die Auf- und Abwärtsflanken müssen perfekt gerade sein, eine Verbiegung (Bogen) zeugt von fehlerhaftem Verhalten des Verstärkers.

Bild1 Dreieck-Signal 100Hz

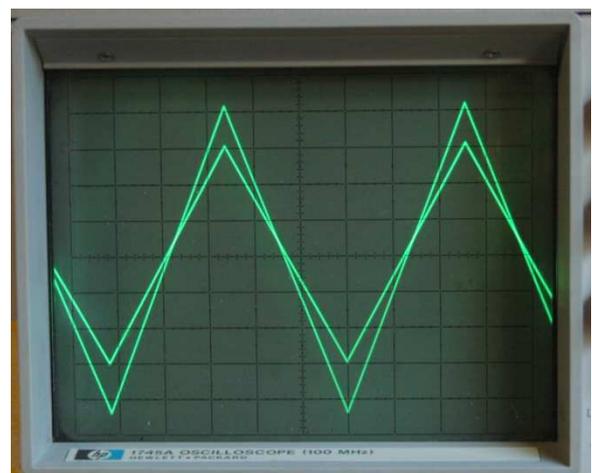


Bild 2 Rechteck-Signal 100Hz

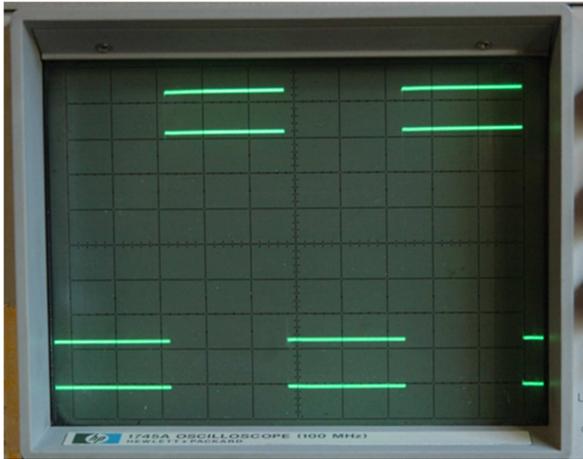
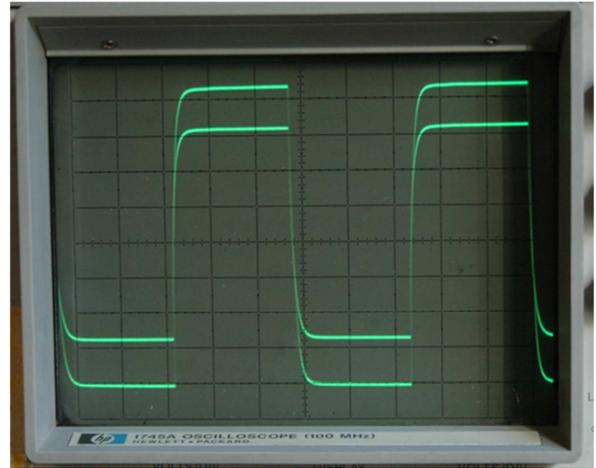


Bild 3 Rechteck-Signal 10kHz



Hier lesenswerte Info zum Thema:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Regelkreis>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Systemtheorie>