

10.4.3 Differenzverstärker (Long-Tail)

Dieser Schaltungstyp vereinigt zwei verschiedene Röhren-Grundsaltungen: Die erste Röhre arbeitet in Kathoden-Basis-Schaltung mit Stromgegenkopplung, die zweite Röhre arbeitet in Gitter-Basis-Schaltung; sie wird von der ersten Röhre über die Kathode angesteuert. In der Fender-Historie steht der Differenzverstärker am Ende einer Entwicklungsreihe: Paraphase (1946 – 1951), Paraphase mit Gegenkopplung (1951 – 1954), Kathodyn (1955 – 1957), Differenzverstärker (ab 1956). Andere Hersteller, wie z.B. VOX (1958) oder Marshall (1962), die erst ein gutes Jahrzehnt nach Fender mit dem Verstärkerbau begannen, verwendeten den Differenzverstärker gleich von Anfang an.

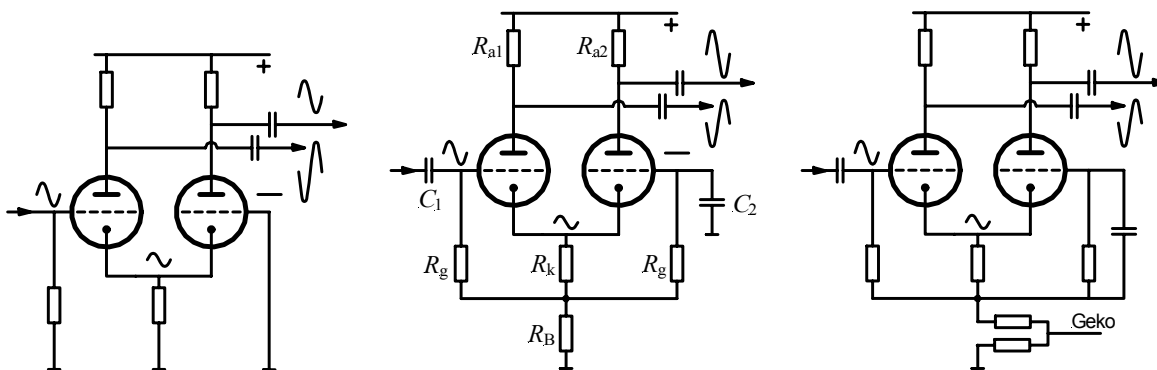


Abb. 10.4.8: Differenzverstärker mit Kathodenkopplung.

Das linke Bild von **Abb. 10.4.8** zeigt die Grundsaltung des Differenzverstärkers. Wechselspannungsaussteuerung der linken Röhre ändert ihren Anoden- und Kathodenstrom, und führt zu je einem Wechselspannungsabfall am Anoden- und Kathodenwiderstand. Da sich mit der Kathodenspannung auch die Steuerspannung der rechten Röhre ändert, wird auch ihr Anoden- bzw. Kathodenstrom geändert (Gitter-Basis-Schaltung). Als **Beispiel**: Wenn die (gegen Masse definierte) Gitterspannung der linken Röhre um 2 mV steigt, nimmt die Kathodenspannung um 1 mV zu. Ihre Gitter/Kathodenspannung hat folglich um 1 mV zugenommen, während die Gitter/Kathodenspannung der rechten Röhre um 1 mV abgenommen hat. Bei identischer Röhrensteilheit würden hieraus betragsgleiche, aber gegenphasige Anodenspannungen resultieren. Dieses in Büchern gerne verwendete Beispiel hat allerdings einen kleinen Schönheitsfehler: Die Summe der Anodenstromänderungen wäre null, und damit bliebe das Kathodenpotential konstant – die rechte Röhre würde nicht angesteuert. Mit einer kleinen Änderung geht's aber: Das linke Gitterpotential steigt um 3 mV, das Kathodenpotential steigt um 1 mV, die Anodenspannungsänderungen sind gegenphasig – aber nicht mehr betragsgleich! Bei üblicher Dimensionierung wäre die Wechselspannungsverstärkung der rechten Röhre nur ungefähr halb so groß wie die der linken, und außerdem wäre sie ziemlich stark von den individuellen Röhrendaten abhängig. Aus diesem Grund wird der Kathodenwiderstand vergrößert, wodurch die Spannungsverstärkung beider Röhren zwar reduziert, aber röhrenunabhängiger wird (Stromgegenkopplung). Das mittlere Bild in Abb. 10.4.8 zeigt eine derartige Schaltung (VOX AC-30), das rechte Bild enthält zusätzlich einen Eingang für eine den Ausgangsübertrager einschließende große Gegenkopplungsschleife (Marshall, Fender ab 1956).

Die typische Differenzverstärker-Röhre ist bei Fender zunächst die **12AX7** (7025, ECC83), in der Blackface-Epoche erfolgt dann der Wechsel zu der im Ausgang eher niederohmigen **12AT7** (ECC81). VOX verwendet die ECC83 (12AX7), Marshall ebenso.

DATENBLATTANGABEN: Innenwiderstand = 11 k Ω (ECC81) bzw. 63 k Ω (ECC83).

Die genaue Schaltungsanalyse des Differenzverstärkers zeigt, dass trotz der Stromgegenkopplung die Spannungsverstärkungen der beiden Röhren betragsmäßig unterschiedlich sind. Bei einer typischen Fender-Schaltung (Pro Amp AA763: $R_a = 100 \text{ k}\Omega$, $R_g = 1 \text{ M}\Omega$, $R_k = 470 \text{ }\Omega$, $R_B = 27 \text{ k}\Omega$) beträgt dieser Unterschied ungefähr 7%. In einem späteren Modell (Pro Reverb AA 165) wurde vermutlich aus diesem Grund ein Anodenwiderstand (R_{a1}) auf $82 \text{ k}\Omega$ abgeändert. Bei der nächsten Variante (AB 668) sind die Anodenwiderstände dann wieder gleich groß, aber nur mehr $47 \text{ k}\Omega$, und dabei bleibt's für längere Zeit. VOX verwendet zwei gleich große Widerstände (und keine Über-Alles-Gegenkopplung!), Marshall hingegen zumeist die 82k/100k-Paarung, und eine frequenzabhängige Über-Alles-Gegenkopplung.

Der Gitterableitwiderstand R_g der ersten Röhre beträgt typischerweise $1 \text{ M}\Omega$, und vermutlich wurde dieser Wert auch als Eingangswiderstand angesehen. Mit einem 20-nF-Koppelkondensator (z.B. Fender Twin 5F8A) ergäbe sich damit eine **Hochpass**grenzfrequenz von 8 Hz – für einen Gitarrenverstärker schon sehr niedrig, aber wohl kompatibel zu damaligen HiFi-Lehren. Nur: Durch die Gegenkopplung (R_B) wird nicht nur die Spannungsverstärkung verringert, sondern auch der Eingangswiderstand vergrößert (Bootstrap): Er beträgt deshalb nicht $1 \text{ M}\Omega$, sondern ca. $2 \text{ M}\Omega$, und die Grenzfrequenz rutscht auf 4 Hz ab. Das wäre nun selbst für einen Bassverstärker ausreichend, und tatsächlich findet man auch beim 5F6-Bassman einen 20-nF-Koppelkondensator. Einige Jahre später erhält der 6G6-B-Bassman allerdings einen 500-pF-Koppelkondensator! Die Berechnung der Grenzfrequenz würde 160 Hz ergeben, **aber**: dabei darf man nicht übersehen, dass neben der Kathodengegenkopplung auch noch eine zweite Gegenkopplungsschleife wirksam ist – die Berechnung wird damit schwieriger, weil weitere phasendrehende RC-Glieder und vor allem der Ausgangsübertrager zu berücksichtigen sind. Da vom 6G6-B-Bassman nur der Schaltplan, aber kein Originalgerät zur Verfügung stand, sollen deshalb keine quantitativen Vermutungen in die Welt gesetzt werden, sondern nur die allgemeine Aussage: Als Eingangskondensator (C_1) des Differenzverstärkers kamen bei Fender sehr unterschiedliche Kapazitäten ($250 \text{ pF} - 20 \text{ nF}$) zum Einsatz; die tatsächlichen Hochpassgrenzfrequenzen dieser unterschiedlichen Schaltungen sollten gemessen, und nicht aus Schaltplänen berechnet werden. Beim AC-30 sind's übrigens 47 nF , bei Marshall 22 nF .

In **Abb. 10.4.9** sind die Gitterspannungen eines Super-Reverb für drei verschiedene Aussteuerungen dargestellt. Bei kleiner Aussteuerung unterscheiden sich die beiden Signale geringfügig in ihren Amplituden, bei großer Aussteuerung entsteht eine signifikante Unsymmetrie. Die unterschiedliche Begrenzung zu negativen Spannungen hin könnte man eigentlich ignorieren, weil in diesem Bereich die jeweilige Endröhre sowieso sperrt; durch den unterschiedlichen Gleichanteil der beiden Steuersignale werden aber die beiden Koppelkondensatoren unterschiedlich polarisiert, und daraus resultieren unterschiedliche Tastverhältnisse in den beiden Endstufen-Anodenströmen. Diese durch Gitterstromfluss hervorgerufene Unsymmetrie wird in Kap. 10.4.4 ausführlicher erläutert.

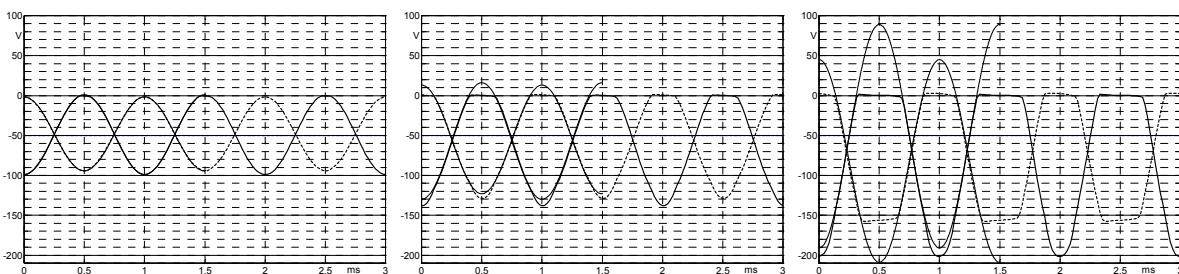


Abb. 10.4.9: Messungen am Differenzverstärker eines Fender Super-Reverb (AB-763, ohne Gegenkopplung). Endröhren-Bias = -50 V . Gitterspannung der ersten Endröhre ($V_7 = \text{—}$) bzw. der zweiten Endröhre ($V_8 = \text{- - -}$). In der linken Bildhälfte sind zum Vergleich unverzerrte Kosinusschwingungen dargestellt.