

10.4 Phasenumkehrstufe (Phase-Splitter)

Mit einer einzigen Endröhre (Eintakt-Betrieb) lässt sich nur eine kleine Ausgangsleistung erreichen, für hohe Leistungen ist Gegentakt-Betrieb erforderlich (Kap. 10.5). Eine Gegentakt-Endstufe benötigt zwei um 180° gegeneinander phasenverschobene Ansteuersignale. Diese zueinander gegenphasigen Spannungen werden in einer oder zwei Röhren in der sog. Phasenumkehr-Stufe (engl. PHASE-SPLITTER) erzeugt. Es gibt im Wesentlichen drei Schaltungskonzepte: Die mit $\nu = -1$ arbeitende Röhre in Kathoden-Basis-Schaltung (Paraphase), die Kathodyn-Schaltung, und den mit Gitter-Basis-Schaltung arbeitenden Differenzverstärker.

10.4.1 Kathoden-Basis-Schaltung (Paraphase)

Das Konzept ist einfach: Eine Triode verstärkt, ihre Anodenspannung ist sowohl Steuersignal für die eine Endröhre, als auch – über Widerstände abgeschwächt – Steuersignal der zweiten Triode; deren (gegenphasige) Anodenspannung steuert die andere Endröhre an (**Abb. 10.4.1**).

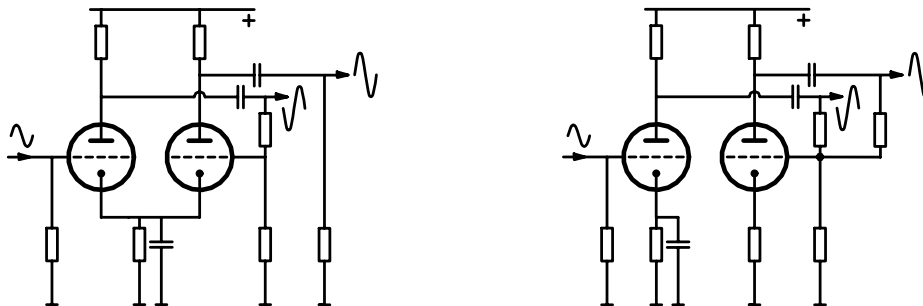


Abb. 10.4.1: Phaseninverter in Kathoden-Basis-Schaltung. Rechts: Modifizierte Versionen mit Gegenkopplung.

Die **Paraphase-Grundsaltung** findet man vor allem in frühen Gitarrenverstärkern (z.B. 1947, Fender Deluxe). Schon bald wurde sie modifiziert, dann durch die Kathodyn-Schaltung abgelöst. Der Vorteil der Paraphase-Schaltung liegt in der großen Spannungs-Verstärkung und der relativ großen Ausgangsspannung der beiden Röhren. Nachteilig ist, dass die Beträge der beiden Ausgangsspannungen nicht exakt gleich sind, sondern stark von den individuellen Röhrendaten abhängen. Mit einem Abgleich der Teiler-Widerstände ist zwar eine individuelle Symmetrierung möglich, im Laufe des Röhren-Lebens müsste aber immer wieder überprüft werden, ob diese **Symmetrierung** noch passt. Spätestens beim Röhrenwechsel müsste dann neu abgeglichen werden. Eine ganz andere Frage ist natürlich, ob ein Gitarrenverstärker tatsächlich bei symmetrierter Phasenumkehrstufe am besten klingt – aber auch bei gewollter Unsymmetrie müsste diese ja wohl spezifisch sein, und dürfte nicht von zufälligen Röhrenstreuungen abhängen.

Die typische Paraphase-Schaltung, wie sie z.B. im alten **Fender Deluxe** (5B3) zu finden ist, schwächt die Wechselspannung der ersten Triode mit einem $250\text{-k}\Omega / 7.0\text{-k}\Omega$ -Teiler auf ca. $1/44$ ab. Für eine genaue Berechnung muss der Innenwiderstand der ersten Triode zu den $250\text{ k}\Omega$ dazugezählt werden, näherungsweise sind das $50\text{ k}\Omega$. Die zweite Triode verstärkt diese abgeschwächte Spannung wieder um ca. -44 , sodass zwei betragsmäßig gleich große, gegenphasige Wechselspannungen zur Ansteuerung der Endröhren zur Verfügung stehen. Das ist allerdings der Idealfall; in der Realität streut die Verstärkung der zweiten Triode beträchtlich.

Wenn die Spannungsverstärkung der zweiten Triode nicht dem Sollwert entspricht, sondern z.B. um 20% zu klein ist, unterscheiden sich die beiden in der Endstufe erzeugten Halbwellen ebenfalls um 20%; mit der Konsequenz, dass alleine hierdurch ein **Klirrfaktor** von ca. 4% erzeugt wird. Eine derartige Unsymmetrie kann man gut oder schlecht finden – im Hause Fender fand man's nicht gut, und ersetzte (z.B.) beim Deluxe 5D3 den Spannungsteiler am Gitter der zweiten Triode durch eine Strom/Spannungs-**Gegenkopplung**: Die Anodenspannung der zweiten Triode wird abgegriffen (270 k Ω), und erzeugt einen zusätzlichen Strom im Gitterkreis. **Abb. 10.4.2** zeigt die Schaltung des Fender Deluxe 5D3, sie findet sich auch bei anderen Fender-Verstärkern jener Epoche (Super Amp 5D4, Pro Amp 5D5, Twin 5D8).

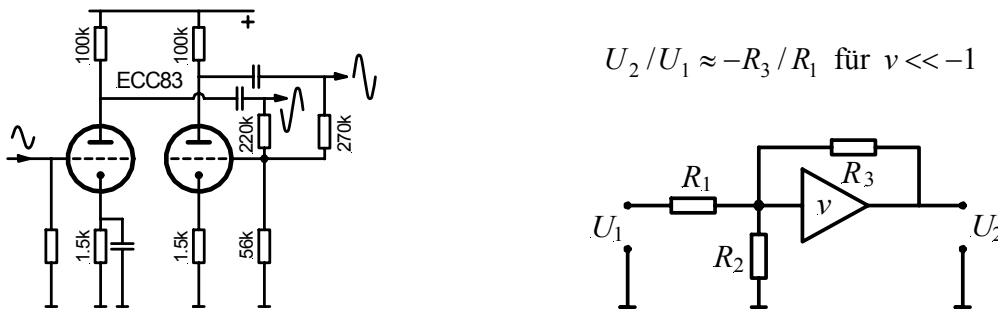


Abb. 10.4.2: Paraphase-Schaltung mit Strom/Spannungs-Gegenkopplung (Fender Deluxe 5D3, 1954).

Das Prinzip der Strom/Spannungs-Gegenkopplung kommt auch beim invertierenden OP zum Einsatz (rechtes Bild): Für gegen $-\infty$ gehende Verstärkung v geht die an R_2 abfallende Spannung gegen null, U_2/U_1 wird nur mehr vom Widerstandsverhältnis, und nicht mehr von v bestimmt [z.B. Tietze/Schenk]. Bei der Röhrenschtung gilt diese Vereinfachung nur näherungsweise, die prinzipielle Wirkung ist aber dieselbe: Wenn sich die Leerlaufverstärkung der zweiten Triode um 10% ändert, ändert sich das Verhältnis der beiden (gegenphasigen) Ausgangsspannungen mit Gegenkopplung nur noch um ca. 1%. Die Gegenkopplung stabilisiert das Verhältnis U_2/U_1 der beiden Ausgangsspannungen, was im Englischen zum Begriff SELF BALANCING PARAPHASE CIRCUIT geführt hat.

Die Gegenkopplung hat aber noch eine weitere Wirkung: Sie verändert den **Innenwiderstand** der rechten Triode. Bei Belastung wird ja die Anoden-Wechselspannung der rechten Triode kleiner – damit verringert sich aber die über 270 k Ω zurückwirkende (gegenkoppelnde) Spannung, woraus eine größere Spannungsverstärkung resultiert. Die lastabhängige Verringerung der Anoden-Wechselspannung wird somit zumindest teilweise ausgeglichen (ausgeregelt). Der Innenwiderstand der linken Triodenschaltung (Abb. 10.4.2) ist einfach die Parallelschaltung von Röhren-Innenwiderstand (z.B. 63 k Ω) und Anodenwiderstand (z.B. 100 k Ω), also in diesem Beispiel ca. 39 k Ω . Berücksichtigt man noch die Last (ca. 220 k Ω), ergibt sich für die Gesamtschaltung $R_{i1} \approx 33$ k Ω . Bei der rechten Röhre ergibt die Berechnung (incl. Belastung) $R_{i2} \approx 12$ k Ω . Die Gegenkopplung hat also den Innenwiderstand des zweiten Röhrensystems auf ungefähr 1/3 reduziert. Solange die Belastung der beiden Paraphase-Ausgänge vernachlässigbar ist, spielen unterschiedliche Innenwiderstände keine Rolle. Durch die Eingangskapazitäten der Endröhren und bei Gitterstromfluss können sich aber Lastwiderstände ergeben, die zu u.U. beachtlichen Unsymmetrien führen.

Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass das Steuersignal der einen Endröhre über *einen* RC-Hochpass läuft, das der anderen Endröhre aber über deren *zwei* – daraus resultieren Phasendrehungen im tieffrequenten Bereich. Ähnliches passiert bei hohen Frequenzen: Der Umweg über das zweite Triodensystem wirkt als zusätzlicher Tiefpass, der hochfrequent für Phasenfehler sorgt.

In **Abb. 10.4.3** sind die Ausgangsspannungen einer nicht-gegengekoppelten Paraphase-Stufe dargestellt. Bei kleiner Aussteuerung (links) entstehen tatsächlich zwei gegenphasige, in etwa betragsgleiche Spannungen, mit zunehmender Aussteuerung beginnen Trioden-Begrenzungen sichtbar zu werden, die den Arbeitspunkt des Koppel-Kondensators verschieben. In der unteren Bildzeile tritt ab +20 V Endröhren-Gitterstromfluss auf, der die Spannungsverläufe zu positiven Werten hin begrenzt. Da das Signal der zweiten Triode aber von der begrenzten Anodenspannung der ersten Triode abgeleitet wird, ist das zweite Ausgangssignal auch zu negativen Werten hin begrenzt. Die Übersteuerung der Endröhren ist folglich unsymmetrisch.

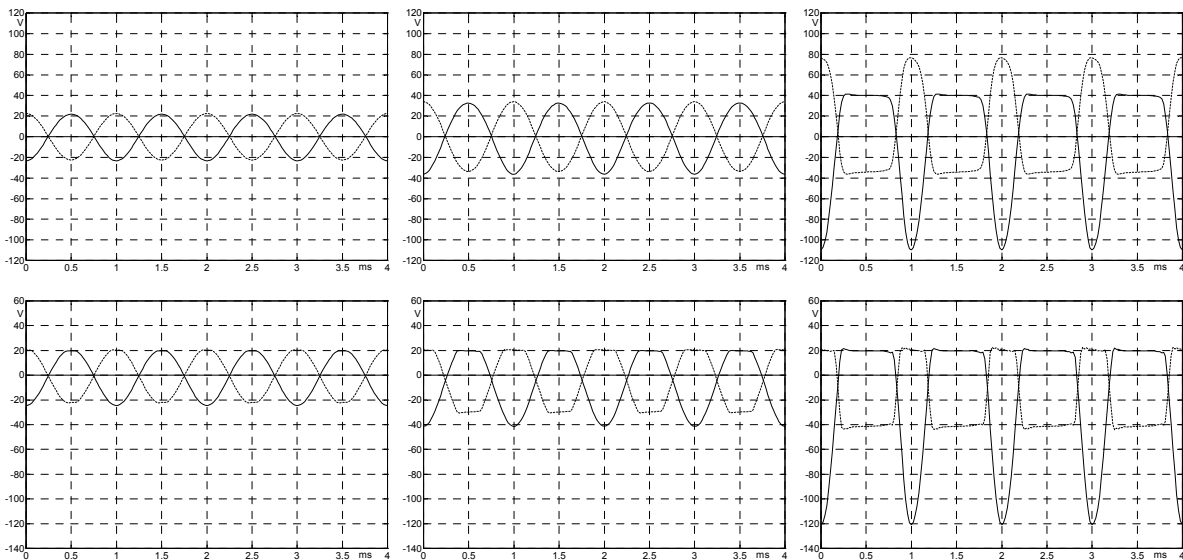


Abb. 10.4.3: Messungen an einer nicht-gegengekoppelten Paraphase-Stufe; 1. Röhre (—), 2. Röhre(---).
Oben: Ohne Gitterstrom-Belastung. Unten: Gitterstromfluss ab 20 V. Trioden-Betriebsspannung: 260 V.

Abb. 10.4.4 stellt entsprechende Messungen für eine gegengekoppelte Paraphase-Stufe dar. Auch hier zeigt sich im nichtlinearen Betrieb eine unterschiedliche Ansteuerung der beiden Endröhren, sowie die schon in **Abb. 10.4.3** erkennbare Veränderung des Tastverhältnisses.

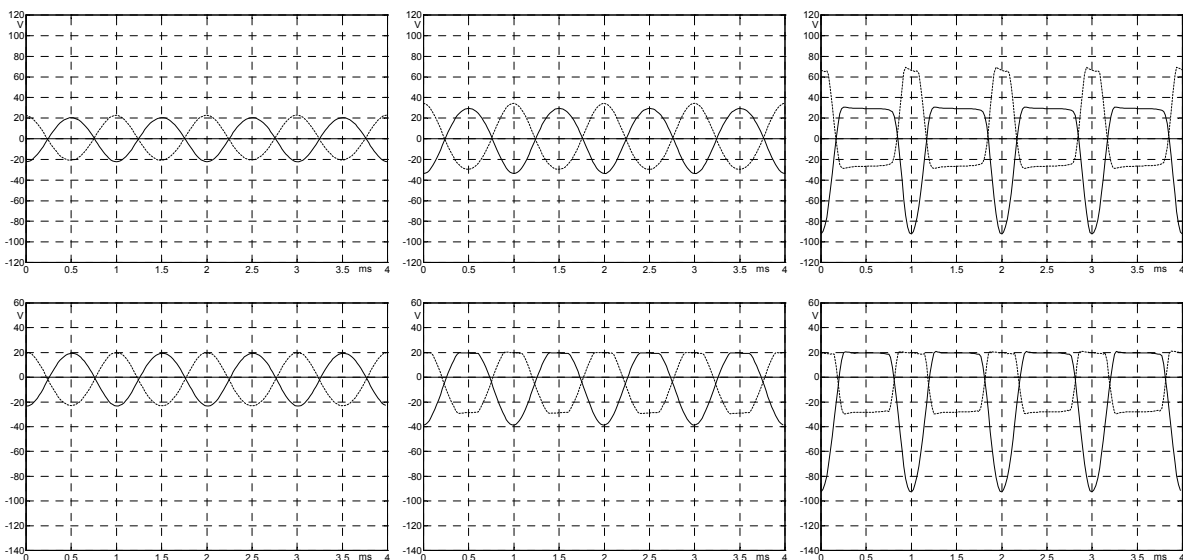


Abb. 10.4.4: Messungen an einer gegengekoppelten Paraphase-Stufe; 1. Röhre (—), 2. Röhre(---).
Oben: Ohne Gitterstrom-Belastung. Unten: Gitterstromfluss ab 20 V. Trioden-Betriebsspannung: 235 V.