

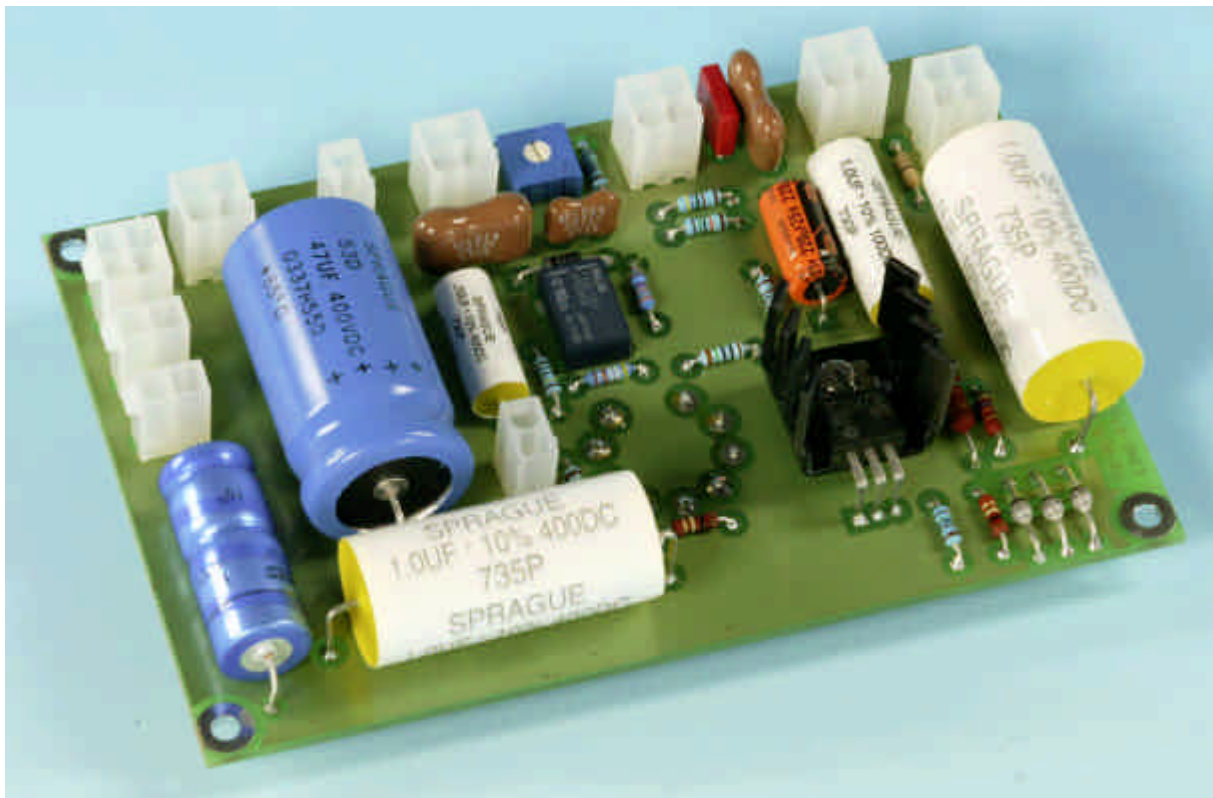
Line- und Klangregelstufe

Von Daniel Gühne und Andreas Krutz

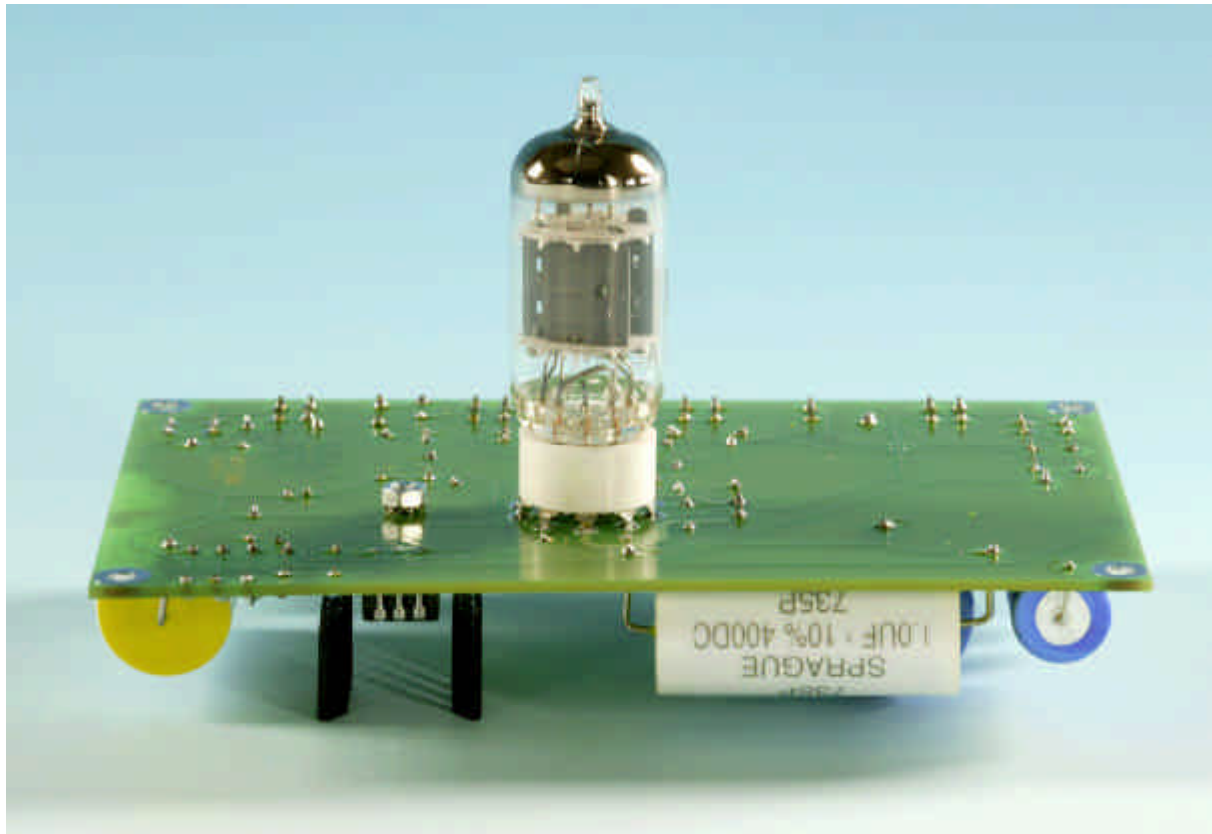
Aufgabe der Stufe:

Die Line- und Klangstufe nimmt das Audiosignal von der Phono-Vorstufe bzw. direkt von einem der hochpegeligen Eingänge (z.B. Tuner oder CD) entgegen. Dieses Signal hat einen Maximalpegel von $U_p=0.5V$.

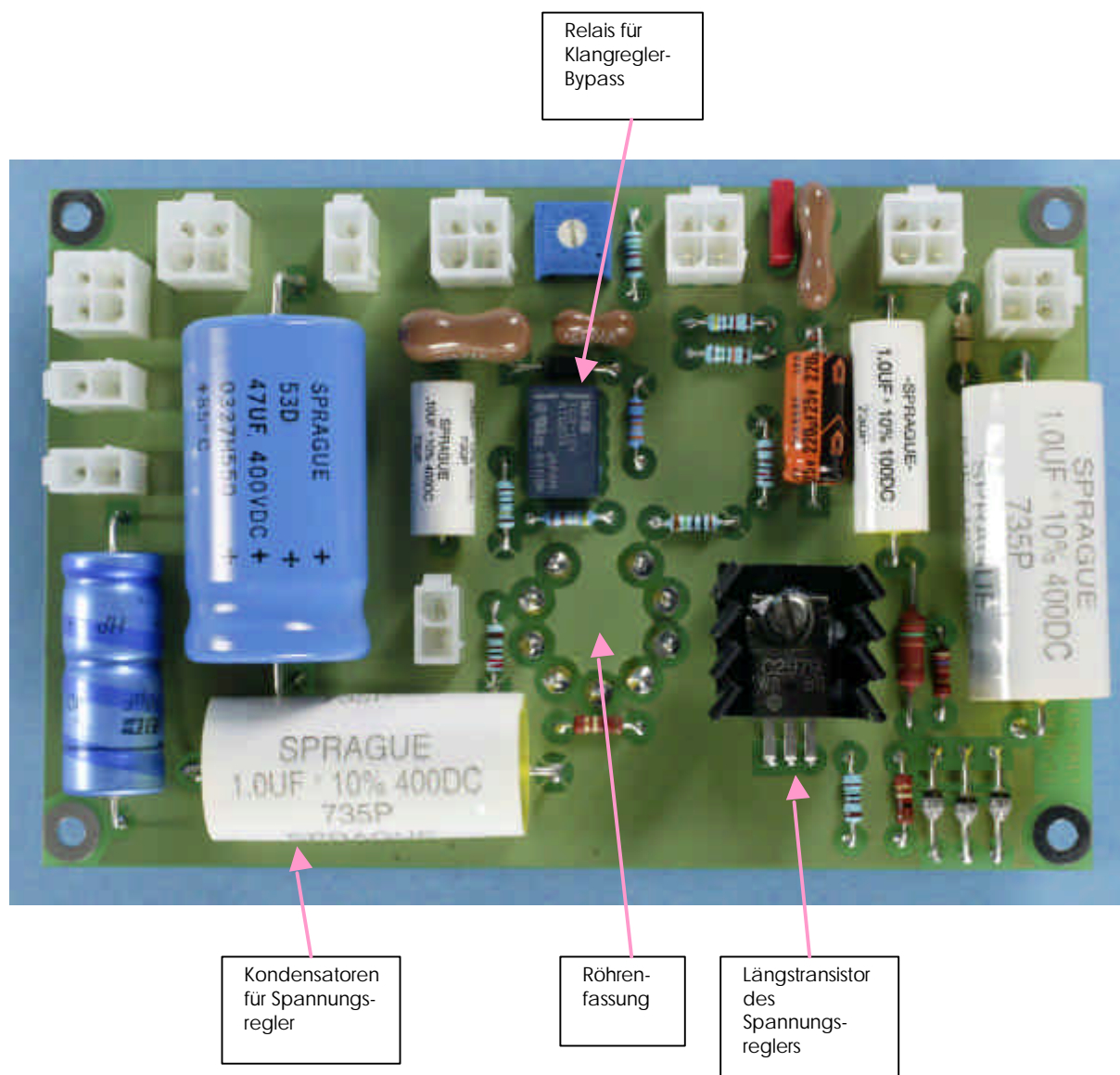
Neben einer Spannungsverstärkung auf den zur Ansteuerung der Endstufe benötigten Pegel bietet diese Stufe verschiedene Einstellmöglichkeiten für das Audio-Signal: Lautstärke und Balance sowie Baß- und Höhenanhebung können über an die Baugruppe anzuschließende Potentiometer eingestellt werden. Das Klangregelnetzwerk kann mittels eines Bypass-Schalters überbrückt werden, da es auch in seiner Neutralstellung eine Phasenverzerrung des Audiosignals bewirkt.



Ansicht der Baugruppe von unten



Ansicht der Baugruppe von der Seite

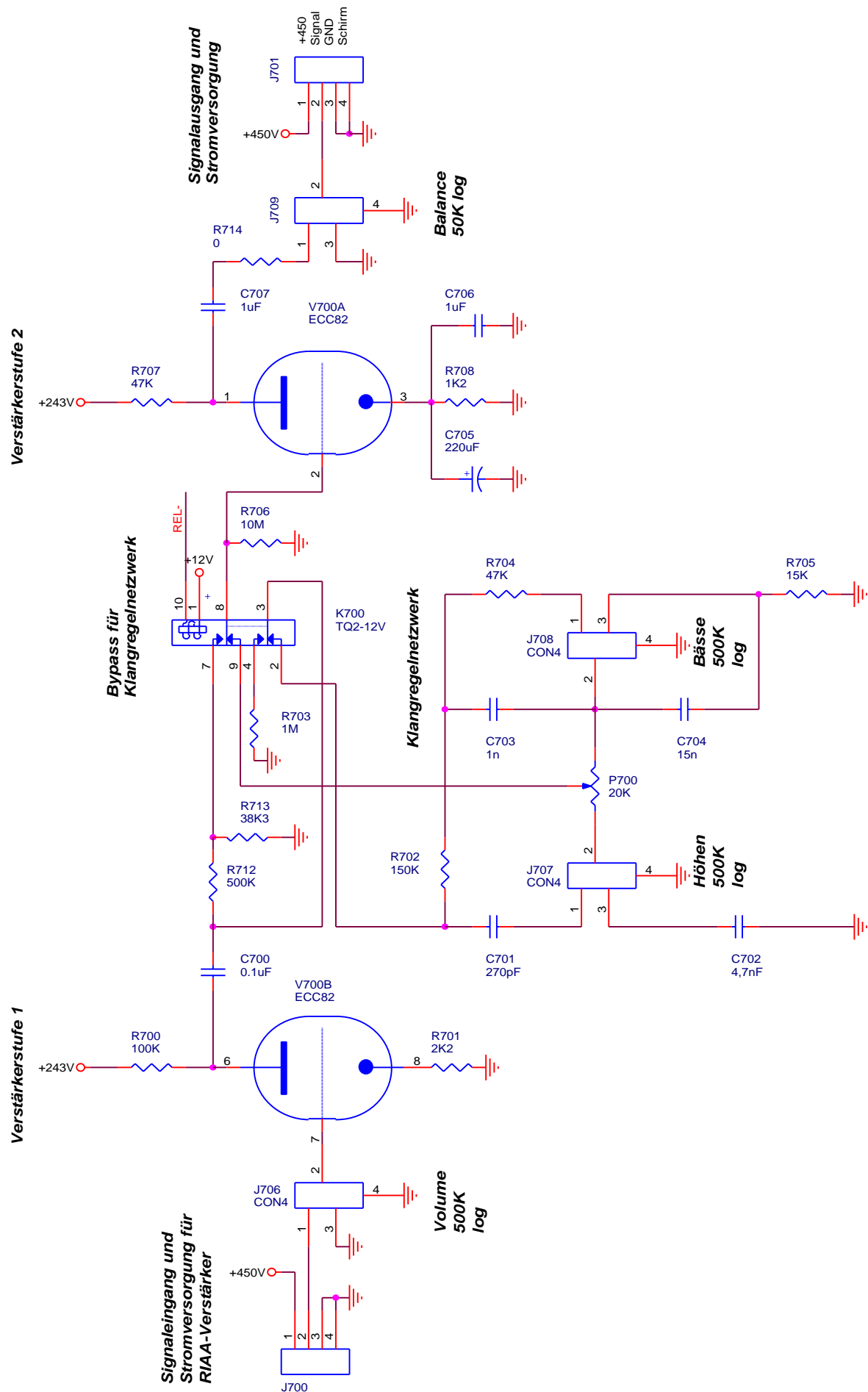


Wichtige Funktionselemente der Baugruppe

Grundsätzlicher Aufbau:

Die Baugruppe besteht aus zwei hintereinandergeschalteten Verstärkerstufen, die jeweils ein Triodensystem der Doppeltriode ECC82 nutzen. Vor der ersten Verstärkerstufe befindet sich der Lautstärkeregler, ein logarithmisches Potentiometer, das über den Steckverbinder J709 angeschlossen wird. Die erste Verstärkerstufe steuert das Klangregelnetzwerk an. Dieses kann über eine Relais aus dem Signalweg genommen werden. Das Ausgangssignal des Klangregelnetzwerks gelangt auf die zweite Verstärkerstufe. Das Ausgangssignal dieser Stufe gelangt über das Potentiometer zur Balanceeinstellung (angeschlossen über J709) an den zur Endstufe führenden Steckverbinder J701.

Als Ausgangsbasis für die hier realisierte Schaltung wurde eine Veröffentlichung in der Fachzeitschrift „Elektor“ (09/2003) genutzt. Die Schaltung wurde zunächst analysiert und anschließend an die Gegebenheiten dieses Projekts angepaßt.

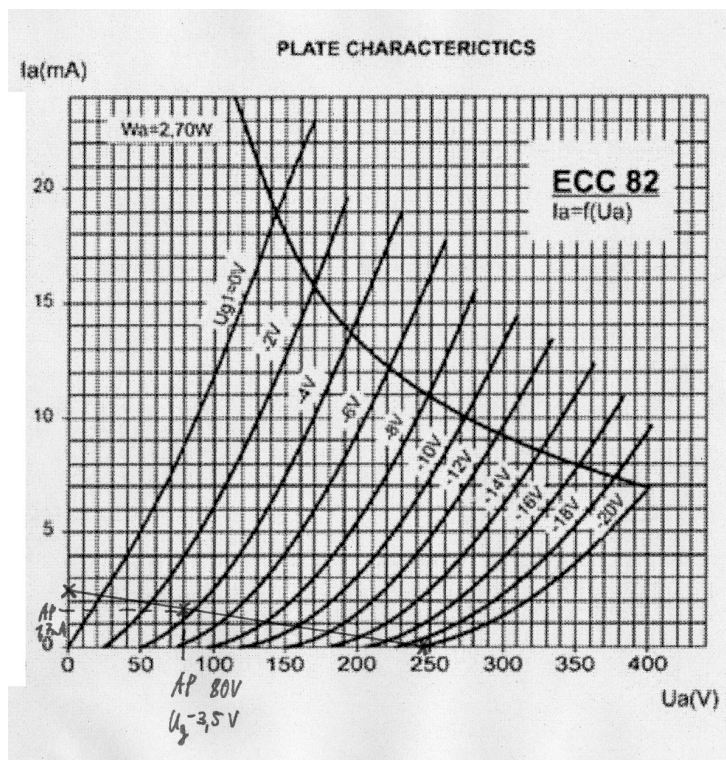


Funktionale Analyse der Schaltung:

Im Eingangsteil befindet sich der Lautstärkereger in Ausführung als logarithmisches Doppeldrehpotentiometer mit einem Gesamtwiderstand von 500k Ω . Die doppelte Ausführung ist wegen der gleichzeitigen Ansteuerung von 2 Stereokanäle notwendig. Der hohe Gesamtwiderstand reduziert den notwendigen Laststrom, was zu geringeren Lasten für die Quelle und damit möglichst optimale Audioeigenschaften bezüglich Klirrfaktor und nichtlineare Verzerrung im Ausgangsteil der Quellen führt. (bei $U_p = 0.5V$ bedeutet das einen maximalen Laststrom von $I_{ein} = 1\mu A$) Die Potentiometer zur Lautstärke-(J706), Bass-(J707) und Höhen-(J708) sowie zur Balanceregelung(J709) befinden sich auf einer separaten Platine und werden über Molex-Steckverbinder und entsprechende Kabel mit den Line-Stufen Platinen für den rechten und linken Kanal verbunden.

Die darauf folgende Verstärkerstufe mit der Triode V700B ist in Kathodenschaltung ausgeführt. Es handelt sich dabei um eine der beiden Triodensysteme der Doppeltriode ECC82(Bauteil V700) von JJ-Electronic. Diese haben wir gewählt, da diese Doppeltriode als Bauteil aus laufender Serienproduktion auf dem Markt verfügbar ist.

Unter den Bedingungen Anodenwiderstand $R_2 = 100k\Omega$ und Kathodenwiderstand $R_1 = 2.2k\Omega$ und einer Versorgungsspannung von $U_a = 243V$ lässt sich die Arbeitsgerade in das Kennlinienfeld eintragen. Dabei sind die Punkte $U_a = 243V/I_a = 0mA$ und $U_a = 0V/I_a = 2.38mA$ die Fixpunkte der Gerade. Diese leiten sich aus dem Zustand der vollständigen Sperrung der Kathode-Anodenstrecke der Röhre, woraus folgt $I_a = 0mA$ und $U_a = 243V$, da an R_2 keine Spannung abfällt. Der andere Fall, das die Röhre voll aussteuert (kein Spannungsabfall zwischen Anode und Kathode), führt zu einem maximalem Strom von $I_{max} = U_a/(R_1 + R_2) = 2.38mA$.

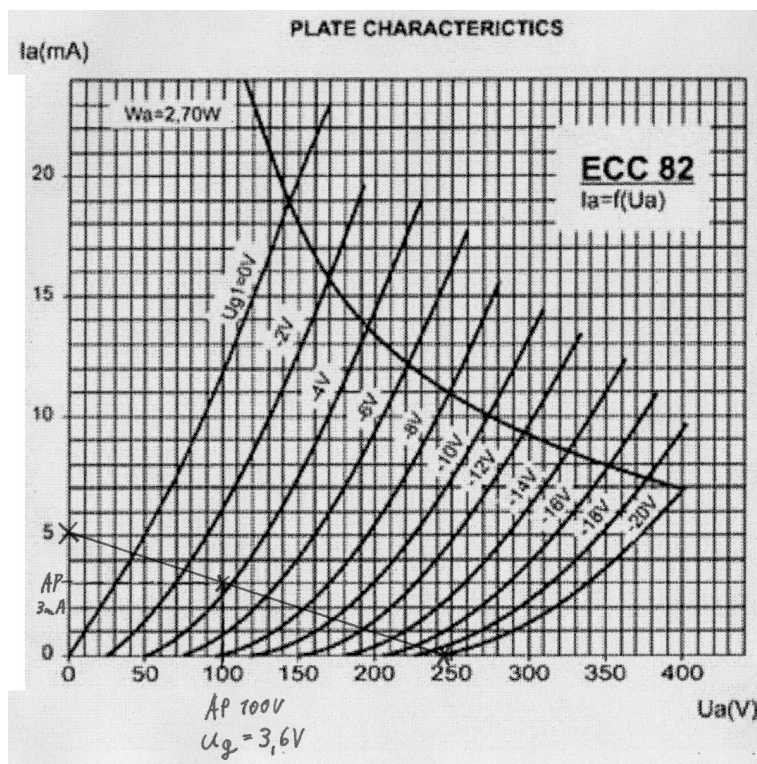


Aus dieser Arbeitsgerade und einem Kathodenwiderstand von 2.2k Ω lässt sich der Arbeitspunkt von ca. $U_g = 3.5V$ und $U_a = 80V$ ermitteln. Aus diesem wiederum lässt sich die Verstärkung des Stromes I_a in Abhängigkeit von U_g ermitteln. Dabei ändert sich der Strom durch die Röhre um 0.6mA bei einer Spannungsänderung $dU_g = 4V$.

Bei V700B ist im Gegensatz V700A nicht über 2 Kondensatoren (C705,C706) der Kathodenwiderstand wechsellspannungsmäßig nicht überbrückt. Deshalb muss für die Berechnung der Verstärkung der Triode V700B noch der Einfluß des erhöhten Stromes durch den Kathodenwiderstand und der damit sich reduzierenden resultierenden Spannung zwischen Gitter und Kathode beachtet werden. Eine Änderung des Stromes von 0.6mA führt zu einer Erhöhung der Vorspannung um 1.32V. Diese muss zur notwendigen Spannungsänderung $\Delta U_g = 4V$ hinzugezählt werden. Bei einem Anodenwiderstand von 100k Ω und 0.6mA Stromänderung ist $\Delta U_a = 60V$. Daraus resultiert für V700A eine Verstärkung von:

$$V = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} = \frac{60}{4 + 1.32} = \frac{60}{5.32} = 11.3 = 21 \text{ dB}$$

Für V700A hat einen anderen Anodenwiderstand $R_{707} = 47k\Omega$ und einen Kathodenwiderstand $R_{708} = 1.2k\Omega$. Dadurch ergibt sich eine andere Arbeitsgerade von 243V/5.04mA.



Daraus ergibt sich ein Arbeitspunkt von $U_a = 100V$, $U_g = 3.6V$. Bei einer Spannungsänderung am Gitter um 4V ergibt sich eine Anodenstromänderung $\Delta I_a = 1mA$. Daraus ergibt sich eine Anodenspannungsänderung $\Delta U_a = 47V$. Daraus ergibt sich eine Verstärkung von

$$V = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} = \frac{47V}{4V} = 11.75 = 21.40 \text{ dB}$$

Das Klangregelnetzwerk ist als komplexe Wienbrücke ausgeführt. Die mathematische Analyse der Schaltung führt zu der folgenden, sehr komplexen Formel:

$$U_a = \frac{\left[(R5 + Z2) \cdot \left[-\frac{C}{F} + \left(\frac{E}{F} \right) \cdot \frac{\left(B - \frac{EC}{F} \right)}{\left(D - \frac{E^2}{F} \right)} \right] + R6B \cdot \left[\left(-\frac{C}{F} + \left(\frac{E}{F} \right) \cdot \frac{\left(B - \frac{EC}{F} \right)}{\left(D - \frac{E^2}{F} \right)} \right) + \frac{\left(B - \frac{EC}{F} \right)}{\left(D - \frac{E^2}{F} \right)} \right] \right] \cdot U_e}{\left[A - B \frac{\left(B - \frac{EC}{F} \right)}{\left(D - \frac{E^2}{F} \right)} - \frac{C^2}{F} + \frac{CE}{F} \frac{\left(B - \frac{EC}{F} \right)}{\left(D - \frac{E^2}{F} \right)} \right]}$$

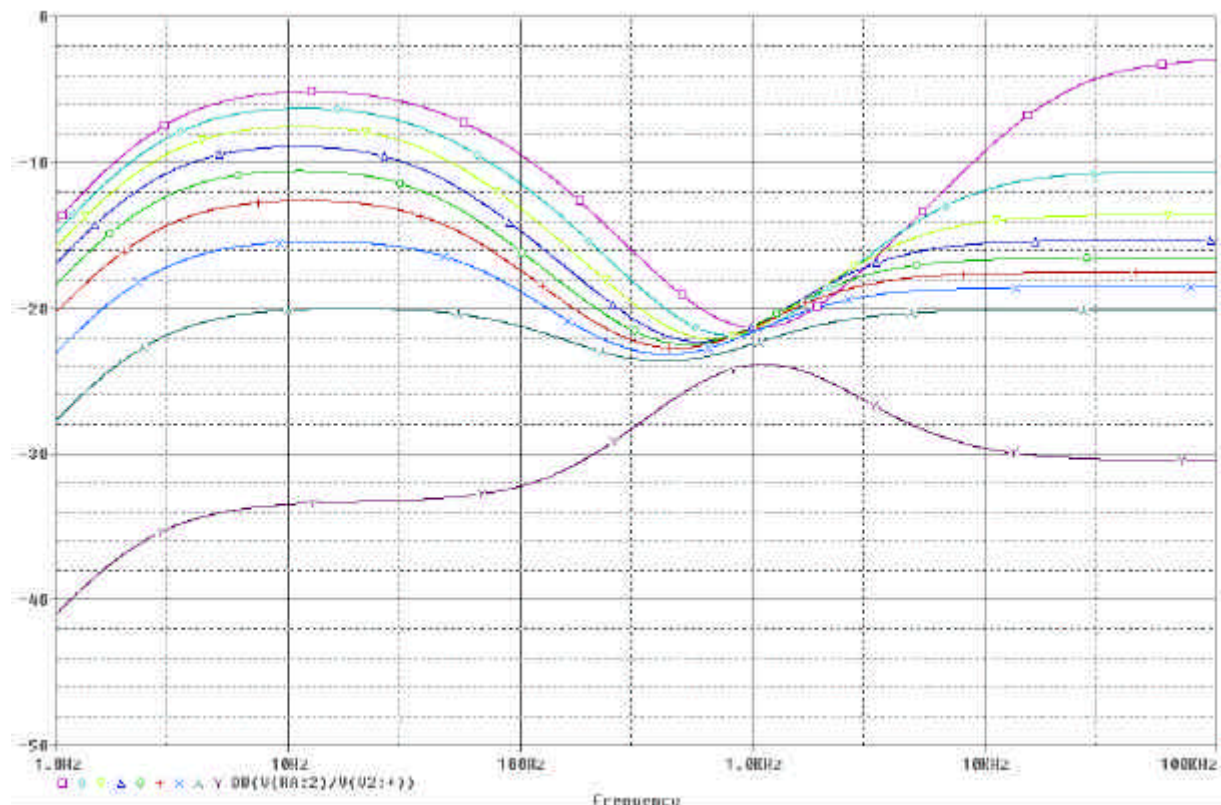
$$A = \frac{1}{j\omega C_{in}} + \frac{1}{j\omega C1} + R1A + R1B + \frac{1}{j\omega C2}, \quad B = -\left(\frac{1}{j\omega C1} + R1A \right)$$

$$C = -\left(R1B + \frac{1}{j\omega C2} \right), \quad D = R2 + Z1 + R6A + R6B + R1A + \frac{1}{j\omega C1}$$

$$E = -(R6A + R6B), \quad F = R6A + R6B + Z2 + R5 + \frac{1}{j\omega C2} + R1B$$

$$Z1 = \frac{1}{j\omega C3 + \frac{1}{R3 + R4A}}, \quad Z2 = \frac{1}{j\omega C4 + \frac{1}{R4B}}$$

Da dies sehr unanschaulich und schwer per Hand analysierbar ist, haben wir das Klangregelnetzwerk in PSpice simuliert. Dabei wurde folgender Betragsfrequenzgang ermittelt:



Das Klangregelnetzwerk erfüllt also seinen Zweck. Deutlich sichtbar ist die Abschwächung der mittleren Frequenzen (um 1kHz) im Bereich von 20-23dB liegt.

Aus diesem Grund haben wir im Bypass Pfad über die Widerstände R712/R713, welche einen Spannungsteiler bilden, eine Abschwächung des Signals um

$$V = \frac{R712}{R713} = \frac{500\text{ k}\Omega}{38.3\text{ k}\Omega} = 13.05 = 22.31\text{ dB}$$

eingebaut. Dadurch ist ein Umschalten zwischen Klangregelung und Bypass im laufenden Betrieb möglich, ohne das es zu störenden Sprüngen in der Lautstärke kommt.

Zum Umschalten dient das Relais K700, welches bei aktivierter Steuerspannung den Bypass schaltet. Die Verwendung eines Relais vermeidet die Notwendigkeit, eine größere Zahl der stöempfindlichen Signalleitungen an die Fronplatte führen zu müssen. Es muß lediglich die, in Bezug auf Störungen völlig unkritische, Spulenspannung des Relais über einen an der Frontplatte befindlichen Schalter zugeführt werden.

V700A hat also die Aufgabe, die Abschwächung des Eingangssignals durch das Klangregelnetzwerk zu kompensieren. V700B hebt das Eingangssignal auf ca. 6V an. Durch den an J709 angeschlossenen Balanceregler wird das Ausgangssignal in dessen elektrischer Mittelstellung halbiert, so dass mit einem Line-Ausgangspegel von 3V gerechnet werden kann.

Alle Potentiometer sind logarithmisch, da die aktustische Wahrnehmung des Menschen bezüglich der Amplitude ebenfalls logarithmisch ist. Eine lineare Änderung der Winkelstellung eines der Potentiometer hat den subjektiven Eindruck einer lineare Änderung der Lautstärke zur Folge. R706 hat die Aufgabe das Gitter der Röhre V700A während des Schaltens des Relais K700 auf Masse zu ziehen. Dadurch werden Störimpulse, die zum Übersteuern der Röhre V700A oder des Endverstärkers führen können, vermieden. R714 bietet die Möglichkeit den Pegel des Ausgangssignals abzusenken, um eventuell eine Pegelanpassung an die zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichts noch nicht entworfene Endstufe zu ermöglichen.

Inbetriebnahme der aufgebauten Schaltung:

Folgende statische Werte für die Arbeitspunkte der Röhren wurden bei der Inbetriebnahme gemessen:

	<i>Kanal 1(Messwert)</i>	<i>Kanal 2(Messwert)</i>	<i>Rechenwert</i>
$V_{\text{Versorgung}}$	244V	246V	243V
$U_{a,V700B}$	84V	89V	80V
$U_{k,V700B}$	3.58V	3.5V	3.5V
$U_{a,V700A}$	100V	100V	100V
$U_{k,V700A}$	3.78V	3.5V	3.6V

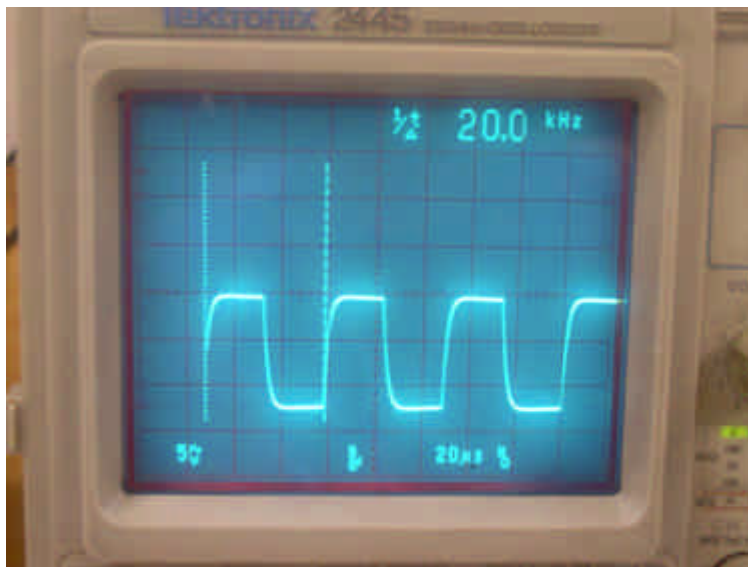
Die Versorgungsspannungen sind etwas höher als die projektierten 243V, liegen aber im 5%-Toleranzbereich der zur Stabilisierung verwendeten Z-Dioden.

Die Abweichungen des Arbeitspunktes liegen bei maximal 12%. Dies ist angesichts der Abweichungen der Röhren untereinander (Unterschied Kanal 1 <--> Kanal 2) und der Qualität der Kennlinienfelder akzeptabel.

Weiterhin haben wir den Frequenzgang mit abgeschaltetem Klangregelnetzwerk vermessen und im Bereich von 20Hz bis 30kHz eine Amplitudenkonstanz von 0.2dB festgestellt.

Die Gesamtverstärkung der Schaltung liegt etwas niedriger als berechnet (5.88V berechnet, 5.35V gemessen, 9% Abweichung). Diese Abweichung von 0.8dB ist akzeptabel.

Weiterhin haben wir die Sprungantwort der Line-Stufe (Rechteck-Signal mit 0.5V Amplitude) überprüft. Für diese Messung wurde wiederum das Klangregelnetzwerk abgeschaltet.



Ausgangssignal der Line-Stufe bei deaktiviertem Klangregelnetzwerk und Rechteck-Eingangssignal mit einer Amplitude von 0.5V und einer Frequenz von 20kHz

Die geringen Verzerrungen des Rechteck-Signals bestätigen abermals die hohe Güte der Stufe.