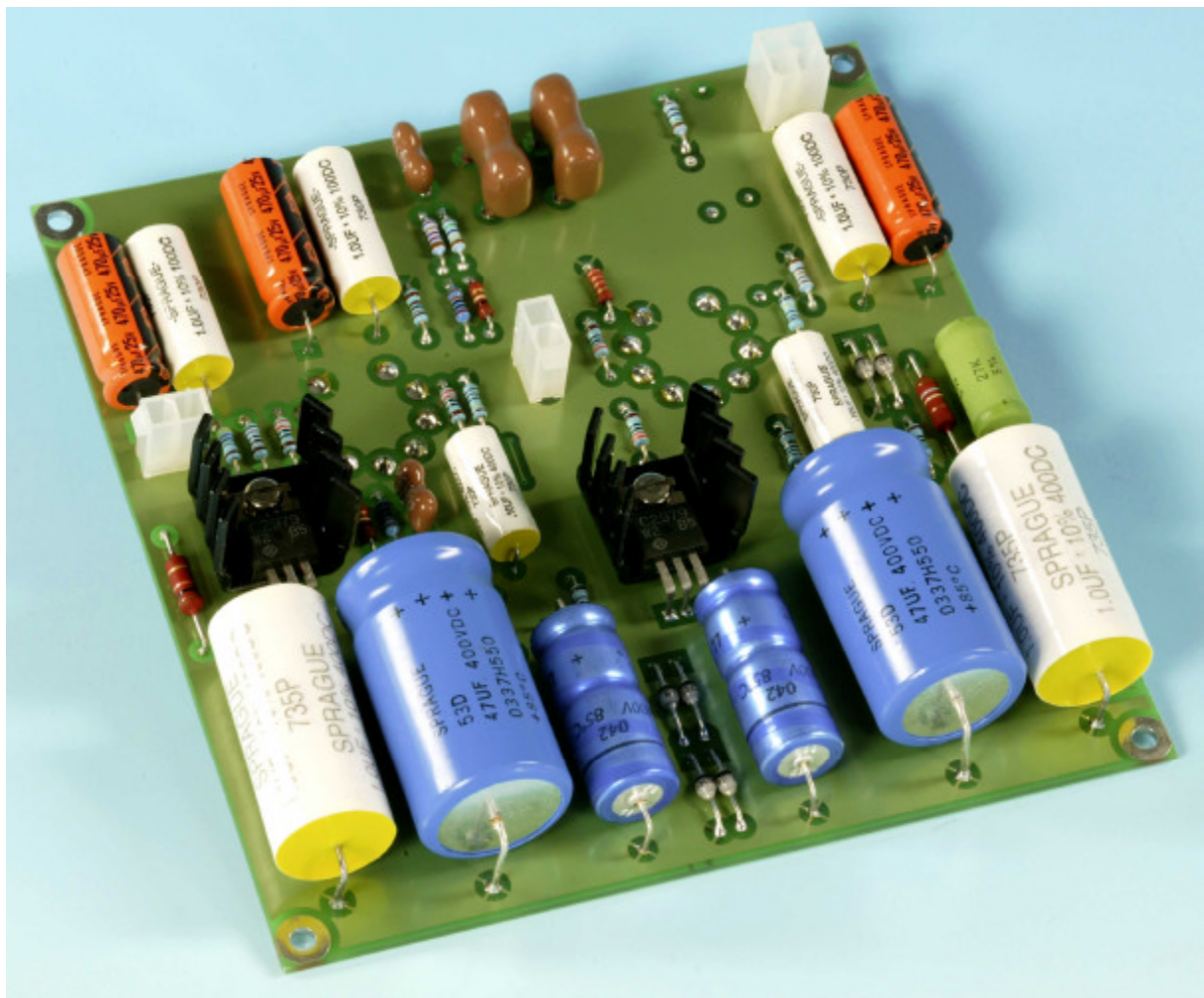


## Phono-Vorverstärker auf Triodenbasis mit geteiltem Entzerrernetzwerk

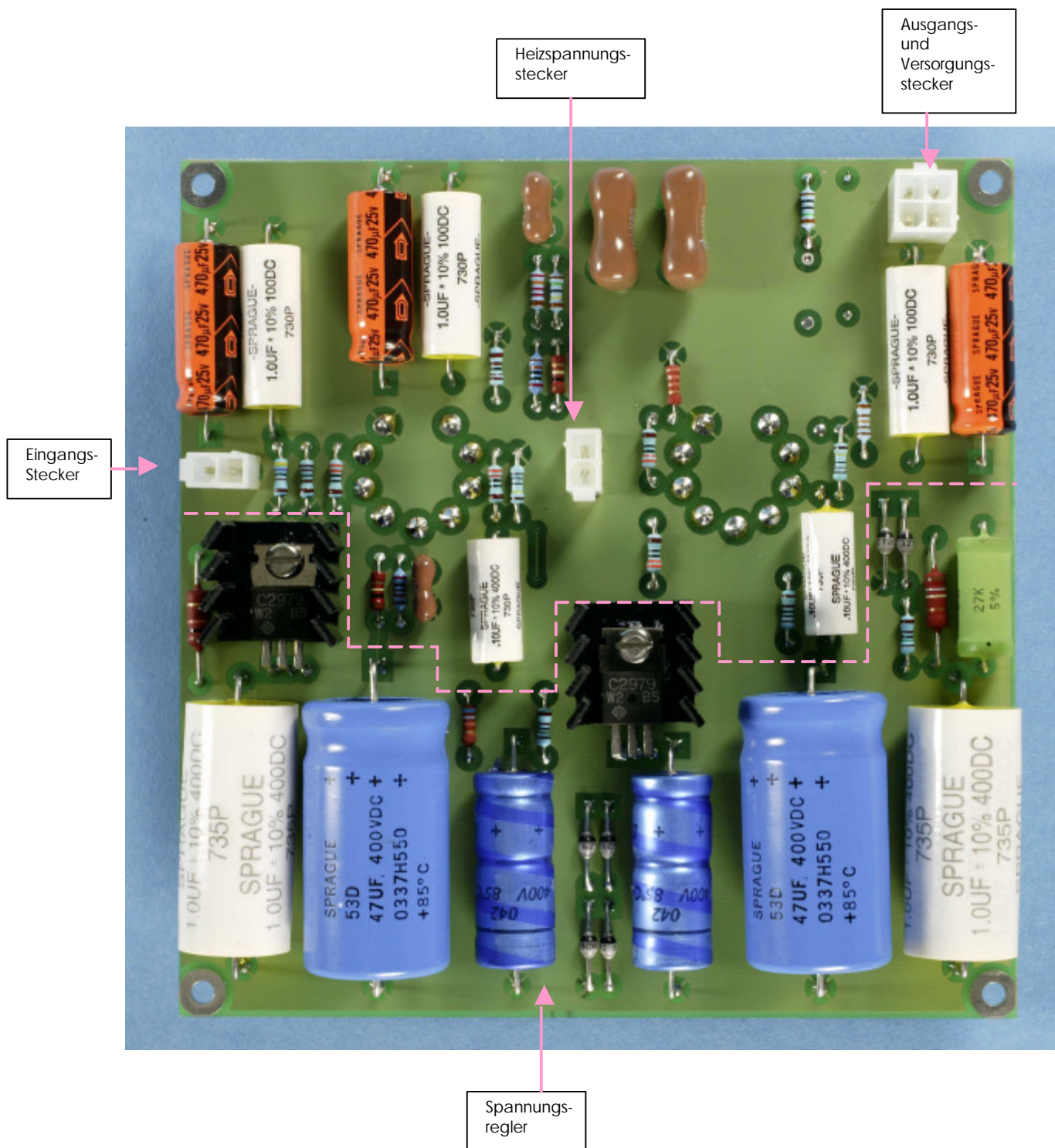
Von Daniel Gühne und Andreas Krutz

### **Aufgabe der Stufe:**

Die Vorstufe hat die Aufgabe das vom Schallplattenspieler bereitgestellte, in seinem Amplitudenfrequenzgang verzerrte Signal um den Faktor 100 zu verstärken und gemäß RIAA-Schneidkennlinie zu entzerren.



*Ansicht der Baugruppe von unten*

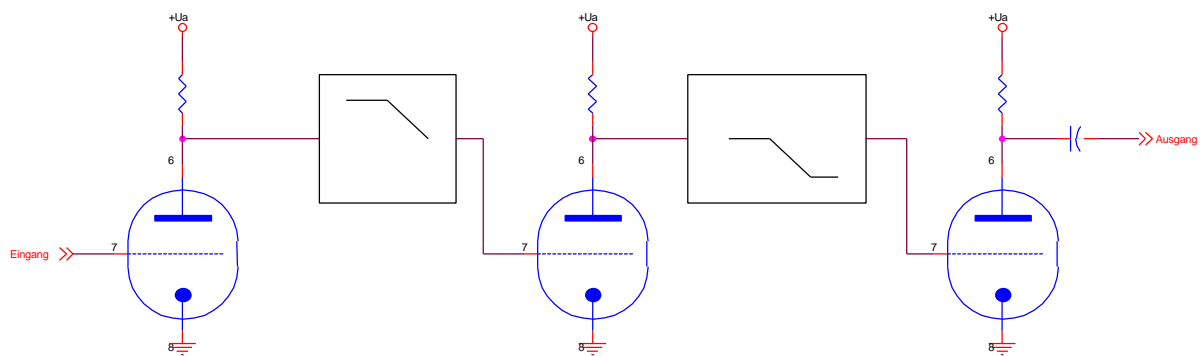


Wichtige Funktionselemente der Baugruppe

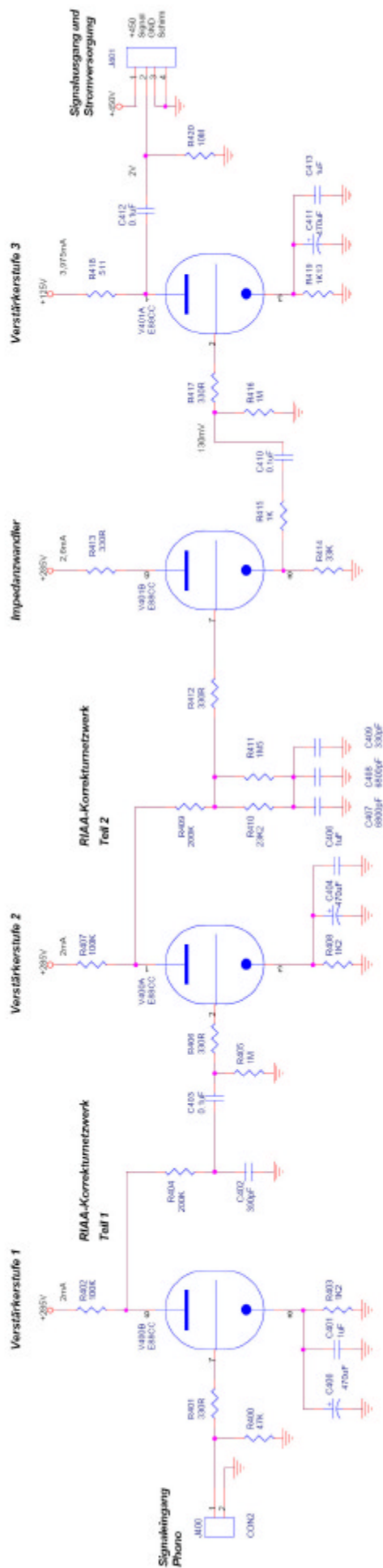
## Aufbau der Schaltung:

Die Schaltung besteht aus 4 Verstärkerstufen, die jeweils mit einem Triodensystem ausgeführt sind. Die erste Stufe führt zunächst eine Spannungsverstärkung durch. Das verstärkte Signal wird in den ersten Teil des –hier in zwei Teilschaltungen aufgeteilten Entzerrernetzwerks- eingespeist. Es folgt eine weitere Verstärkerstufe, die sowohl eine Spannungsverstärkung bereitstellt als auch die beiden Teile des Entzerrernetzwerks voneinander entkoppelt. Der zweite Teil des Entzerrernetzwerks ist besonders empfindlich gegen kapazitive Belastung, daher wird sein Ausgangssignal mit einer besonders hochimpedanten Kathodenfolgerschaltung ausgekoppelt. Eine folgende Verstärkerstufe wurde ursprünglich dazu vorgesehen, eine weitere Spannungsverstärkung hinzuzufügen. Hierbei lag jedoch eine Fehlannahme zugrunde, so daß diese Stufe wieder entfernt wurde und stattdessen das Ausgangssignal des Kathodenfolgers genutzt wird.

Als Ausgangsbasis für die hier realisierte Schaltung wurde eine Schaltung aus dem Buch „Valve Amplifiers“ von Morgan Jones genutzt. Die Schaltung wurde zunächst analysiert und anschließend an die Gegebenheiten dieses Projekts angepaßt.



*Stark abstrahiertes Blockschaltbild des Vorverstärkers*



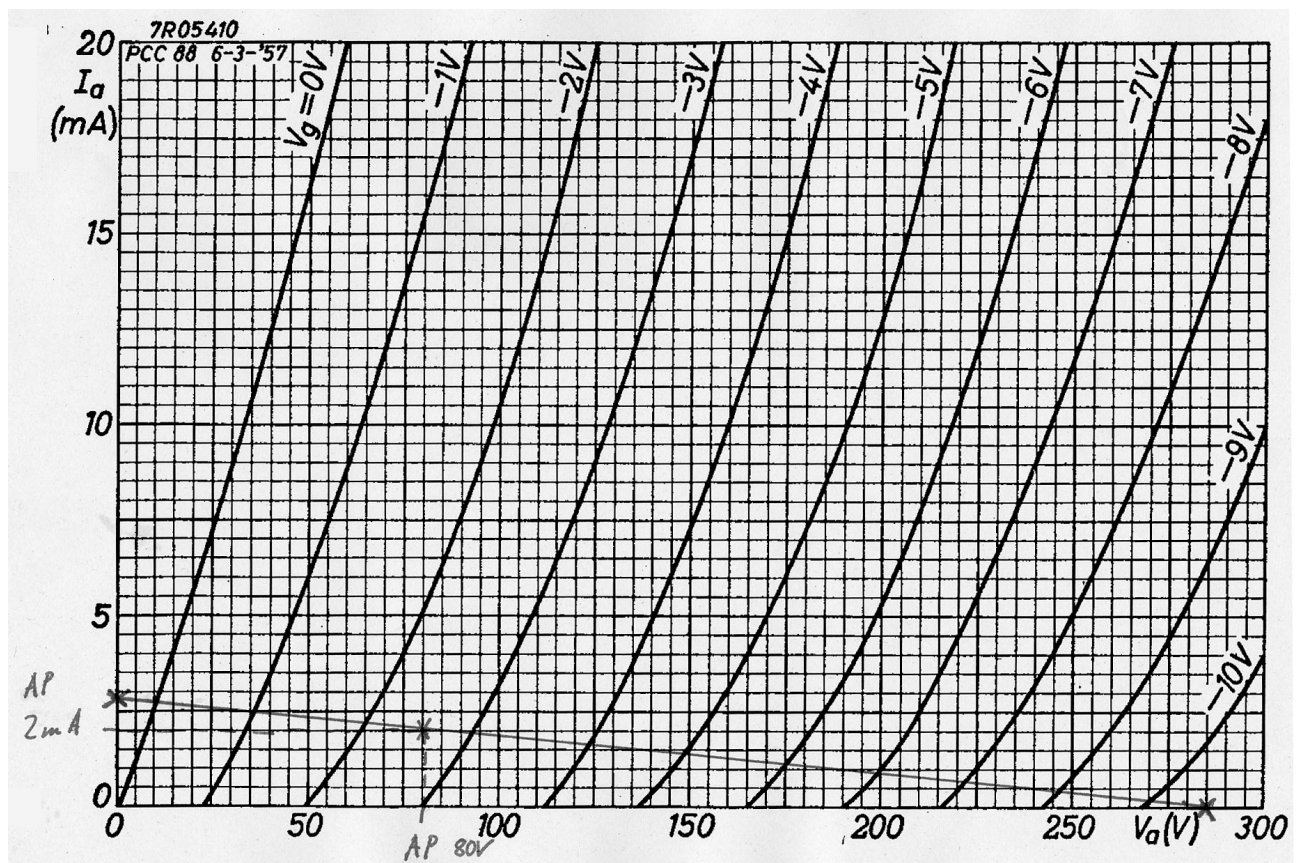


## Analyse der Schaltung:

Die ersten beiden Verstärkerstufen(V400A,V400B) sind identisch aufgebaut. Der Arbeitspunkt der Röhren wird durch die Anoden-(R402, R407) und Kathodenwiderstände(R403,R408) definiert.

$$I_{a,max} = \frac{U_b}{R_{anode} + R_{kathode}} = \frac{285 V}{101.2 k \Omega} = 2.816 mA$$

Dadurch ergibt sich folgende Arbeitsgerade im Kennlinienfeld der E88CC-Röhre:



Das bedeutet eine Anodenspannung  $U_a = 80V$  und eine Gittervorspannung von  $U_g = -2.4V$ . Weiterhin kann man bei einer Gitterspannungsänderung von  $dU_g = 2V$  eine Anodenstromänderung  $dI_a = 0.5mA$  aus der Arbeitsgeraden ablesen. Dies bedeutet eine Anodenspannungsänderung von  $50V$ , also eine Verstärkung von 25.

Die Gittervorspannung wird über die Kathodenwiderstände erzeugt, welche mit Hilfe der Kondensatoren C400 und C401 bzw. C404 und C406 für Wechselspannungen überbrückt sind. Die Zeitkonstante aus Kathodenwiderständen und Überbrückungskondensatoren ist im Verhältnis zur unteren Grenzfrequenz des Hörbereichs ausreichen groß, so daß sich im Zeitmaßstab des Audio-Frequenzbereichs eine zeitlich konstante Gittervorspannung einstellt. Um die hierfür notwendige Kapazität bereitzustellen, ist der Einsatz eines Elektrolytkondensators zwingend. Dieser zeigt jedoch bei den höheren Frequenzen des Audio-Bereichs einen signifikanten Innenwiderstand. Daher wird ein  $1\mu F$ -Folienkondensator zu diesem parallelgeschaltet, der dann für einen vernachlässigbaren Innenwiderstand der Gesamtanordnung über den vollständigen Audio-Frequenzbereich sorgt.

Der Widerstand R400 erfüllt zwei Aufgaben: Zum einen dient er als Gitterableitwiderstand. Zum anderen wird mit seiner Hilfe die Bedingung erfüllt, daß die Spule des Tonabnehmersignals mit  $47k\Omega$  belastet werden muß, um den definierten Frequenzgang zu erhalten. Die Widerstände

R401, R406, R412 und R417 haben die Aufgabe die Gitter der Röhren gegen hochfrequente Einkopplungen zu schützen. Zusammen mit der Gitter-Kathoden Kapazität bilden diese einen Tiefpass mit einer Grenzfrequenz im Bereich von mehr als 1MHz. Zwischen den beiden Stufen befindet sich ein Tiefpass 1.Ordnung, gebildet aus R404 und C402. Die Grenzfrequenz des Tiefpasses beträgt:

$$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot R404 \cdot C402} = \frac{1}{2\pi \cdot 200\text{ k}\Omega \cdot 390\text{ pF}} = 2040\text{ Hz}$$

Das wäre dann der 2.Tiefpass der RIAA-Kennlinie.

Der dem Tiefpass folgende Hochpass aus C403 und R405 hat nur die gleichspannungsmäßige Entkopplung der beiden Verstärkerstufen zur Aufgabe. Seine Grenzfrequenz liegt bei 1.6Hz und damit ausserhalb des Audio-Frequenzbereichs.

Zwischen der 2.Verstärkerstufe und der Impedanzwandler-Stufe(V401B) liegt ein weiteres passives Netzwerk. Dieses wird aus den Widerständen R409, R410, R411 und den Kondensatoren C407, C408, C409 gebildet. Dabei können die Kondensatoren in der Rechnung als ein großer Kondensator, ab hier als  $C_1 = 13.92\text{ nF}$  bezeichnet, aufgefasst werden und die Widerstände R410 und R411 als Widerstand  $R_1 = 22.846\text{ k}\Omega$ . Dann erhält man folgende Übertragungsfunktion:

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1 + j\omega C_1 \cdot R_1}{1 + j\omega C_1 (R_1 + R409)}$$

daraus folgen für die beiden Grenzfrequenzen:

$$f_{gl} = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 (R_1 + R409)} = \frac{1}{2\pi \cdot 13.92\text{ nF} (22.846\text{ k}\Omega + 200\text{ k}\Omega)} = 51.31\text{ Hz} \quad \text{Tiefpassverhalten}$$

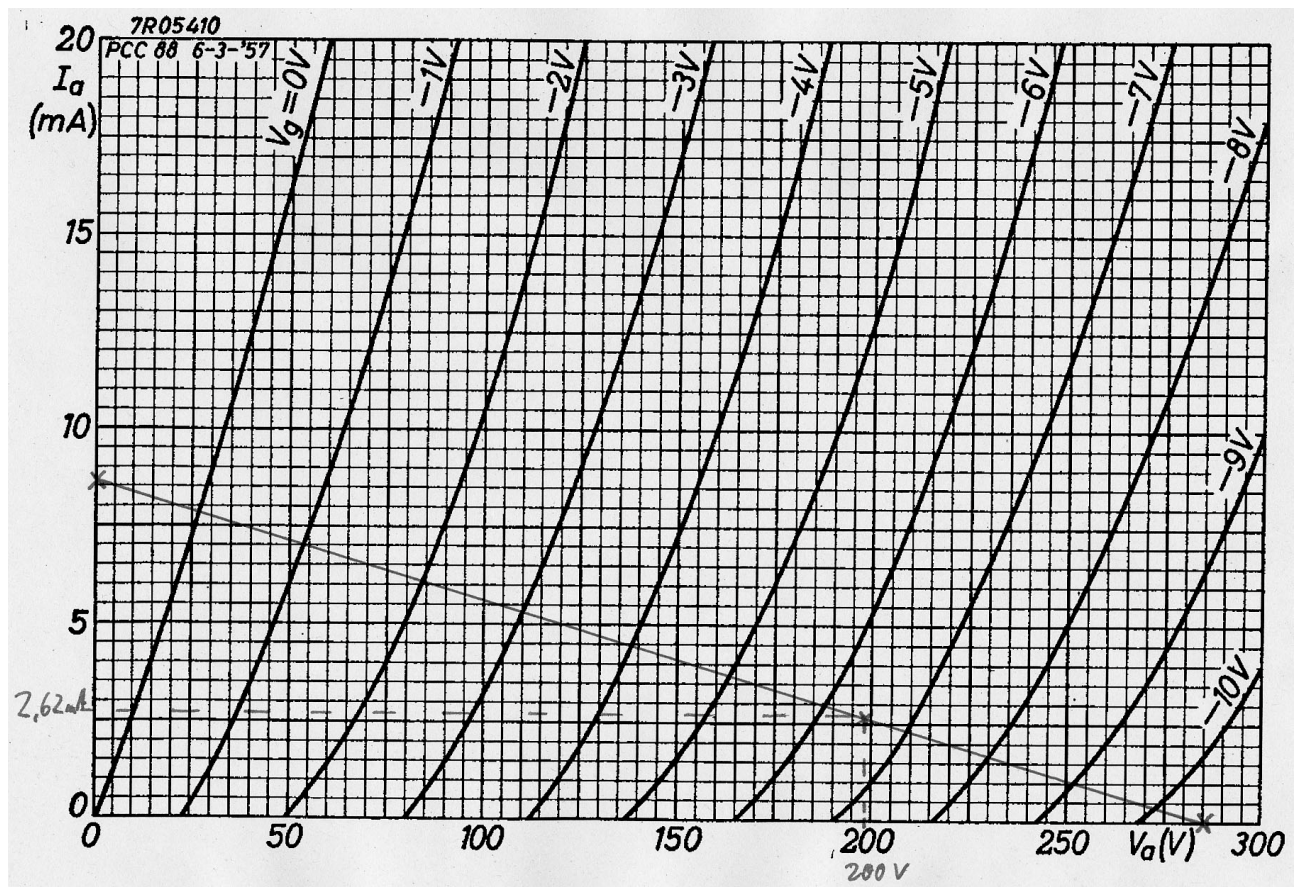
$$f_{g2} = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 \cdot R_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 13.92\text{ nF} \cdot 22.846\text{ k}\Omega} = 500.46\text{ Hz} \quad \text{Hochpassverhalten}$$

Dieses Netzwerk stellt also den 1. Tiefpass und den Hochpass der RIAA-Entzerrerkennlinie dar.

Dem Netzwerk folgt eine weitere Röhre(V401B), die als Impedanzwandler geschaltet ist. Das Gitterpotential der Röhre beträgt dabei die Anodenspannung der 2.Verstärkerstufe  $U_{g, \text{impedanz}} = 80\text{ V}$ . Der maximale Anodenstrom des Impedanzwandlers beträgt:

$$I_{a, \text{max}} = \frac{U_b}{R413 + R414} = \frac{285\text{ V}}{330\text{ }\Omega + 33\text{ k}\Omega} = 8.55\text{ mA}$$

Das ergibt die folgende Arbeitsgerade:



Der Spannungsabfall am Anodenwiderstand R413 kann bei der Betrachtung vernachlässigt werden, da er im maximalen Fall 2.8V beträgt. Im statischen Fall ergibt sich eine Kathodenspannung an R414 von  $U_k = 86.5$  V.

Erhöht sich nun die Gitterspannung um den Wert  $dU$ , so folgt die Kathode diesem Wert. Diese Schaltung ist also ein Kathodenfolger und damit ein Impedanzwandler mit der Verstärkung von etwa 1.

An dieser Stelle wurde der Verstärkungsfaktor der Schaltung für eine Frequenz von 50Hz ermittelt. Dieser Verstärkungsfaktor beträgt 53dB bis zum Impedanzwandler. Wegen dieser mehr als ausreichenden Verstärkung (Projektziel: 40dB) haben wir auf die 3. Verstärkerstufe verzichtet.

**Inbetriebnahme:**

Folgende statische Kennwerte haben wir bei der Stufe festgestellt:

<b>Wert</b>	<b>Kanal 1</b>	<b>Kanal 2</b>	<b>Rechenwert</b>
$U_b$	277V	278V	285V
$U_{k,V400B}$	2.4V	2.35V	2.4V
$U_{a,V400B}$	72V	79.5V	80V
$U_{k,V400A}$	2.44V	2.37V	2.4V
$U_{a,V400A}$	70V	78V	80V
$U_{k,V401B}$	76.5V	85V	86.5V
$U_{a,V401B}$	276V	277V	285V
$U_{g,V401B}$	70V	78V	80V

Die Betriebsspannung der Stufe ist real etwas niedriger aber im 5%-Toleranzbereich der zu Stabilisierung verwendeten Schaltung. Die Kathodenspannungen der ersten beiden Verstärkerstufen entsprechen fast den berechneten 2.4V. Ein deutlicher Unterschied ist zwischen den beiden Röhren für Kanal 1 und Kanal 2 feststellbar. Die Kathodenspannung liegt etwas unterhalb der berechneten Werte (Ruhestrom geringer) und damit die Anodenspannung etwas höher. Aber alles gemessene liegt innerhalb einer für Röhrenschaltungen akzeptablen 10%-Toleranz. Die Kathodenspannungen des Impedanzwandlers liegen auch im berechneten Bereich (+ 6.5V Abstand zur Anodenspannung der 2. Verstärkerstufe).

Fazit: Die berechneten Arbeitspunkte werden von der aufgebauten Schaltung sehr gut eingehalten.

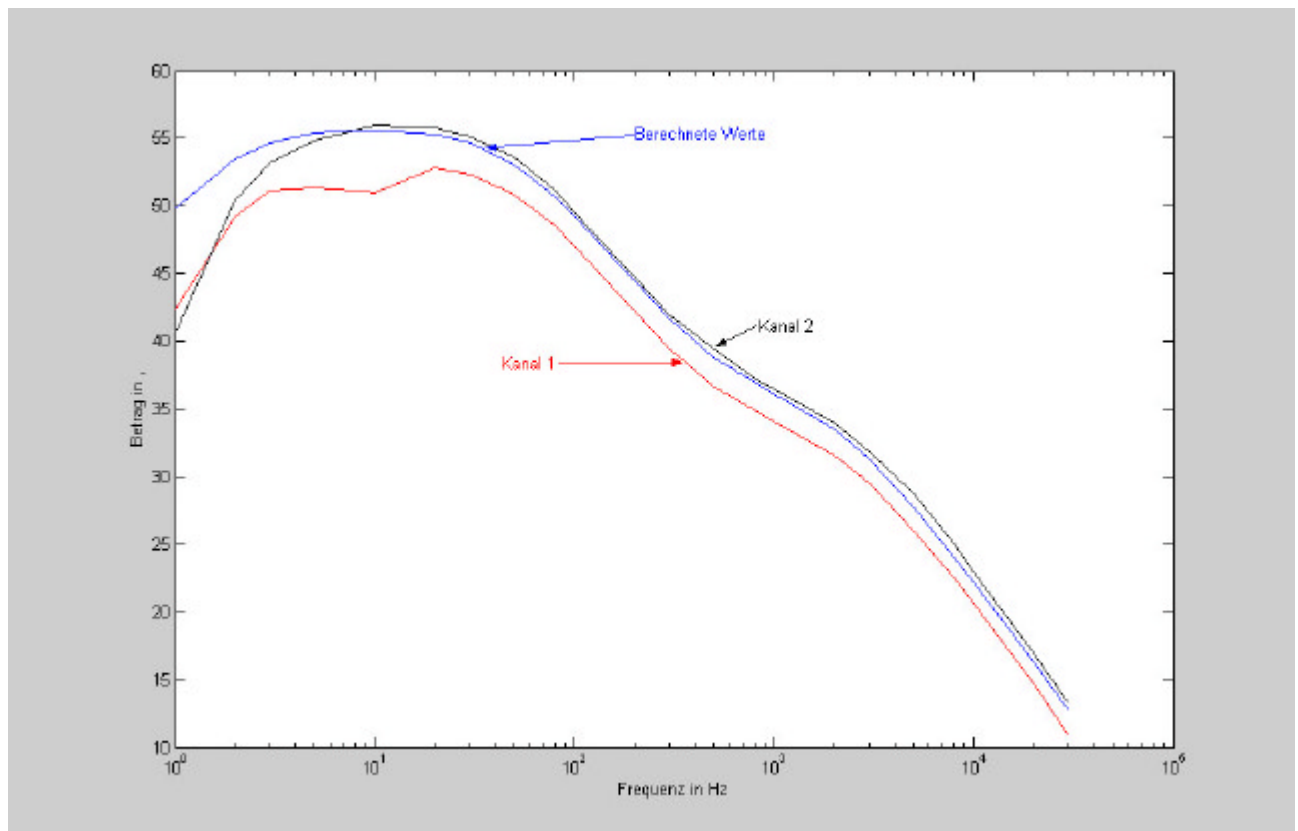


Weiterhin wurde der Betragsfrequenzgang gemessen:

<i><b>Frequenz</b></i>	<i><b><math>U_a</math> Kanal 1</b></i>	<i><b>Betragsgang Kanal1</b></i>	<i><b><math>U_a</math> Kanal 2</b></i>	<i><b>Betragsgang Kanal 2</b></i>	<i><b>Betragsgang Rechenwert</b></i>
1Hz	2.63V	42.38dB	2.15V	40.63dB	49.825dB
2Hz	5.78V	49.22dB	6.6V	50.37dB	53.441dB
3Hz	7.2V	51.13dB	9.1V	53.16dB	54.63dB
5Hz	7.35V	51.31dB	11.05V	54.85dB	55.375dB
8Hz	7.2V	51.13dB	12.0V	55.56dB	55.611dB
10Hz	7.1V	51dB	12.5V	55.92dB	55.626dB
20Hz	8.7V	52.77dB	12.3V	55.78dB	55.276dB
30Hz	8.3V	52.36dB	11.4V	55.12dB	54.639dB
50Hz	6.95V	50.82dB	9.65V	53.67dB	53.05dB
80Hz	5.36V	48.56dB	7.2V	51.13dB	50.66dB
100Hz	4.52V	47.08dB	6.0V	49.54dB	49.26dB
200Hz	2.58V	42.21dB	3.45V	44.74dB	44.42dB
300Hz	1.87V	39.42dB	2.5V	41.94dB	41.689dB
500Hz	1.365V	36.68dB	1.88V	39.46dB	38.846dB
800Hz	1.115V	34.92dB	1.46V	37.27dB	36.928dB
1kHz	1.015V	34.11dB	1.34V	36.52dB	36.157dB
2kHz	0.76V	31.6dB	1.0V	33.98dB	33.47dB
3kHz	0.6V	29.54dB	0.785V	31.88dB	31.253dB
5kHz	0.4V	26.02dB	0.55V	28.79dB	27.723dB
8kHz	0.268V	22.54dB	0.36V	25.11dB	24.01dB
10kHz	0.214V	20.59dB	0.28V	22.92dB	22.162dB
20kHz	0.109V	14.73dB	0.14V	16.9dB	16.266dB
30kHz	0.07V	10.88dB	0.092V	13.26dB	12.767dB

Der Betrag des Eingangspegel war jeweils 20mV.

Daraus ergibt sich folgendes Betragsdiagramm:



Die Eindellung des Frequenzgangs bei etwa 9Hz, Kanal 1 ist wahrscheinlich auf einen Messfehler zurückzuführen. Ansonsten entspricht der Frequenzgang den berechneten und gewünschten Werten. Deutlich ist der höhere Verstärkungsfaktor(+ 2dB) des 2.Kanals zu erkennen, der auf Exemplarstreuungen zwischen den für beide Kanäle verwendeten Röhren zurückzuführen ist. Die Verstärkung liegt so hoch, das auf die ursprünglich vorgesehene 3.Verstärkerstufe verzichtet werden kann.

Für 10kHz beträgt die Verstärkung für die beiden passiven Entzerrernetzwerke bei 0.2 und 0.103. Die Gesamtverstärkung bei 10kHz beträgt 20.59dB bzw. 22.92dB, was entlogarithmiert einem Wert von 10.7 bzw. 14 entspricht. Demnach müsste jede Stufe eine Verstärkung von 22.8 haben. Dies entspricht den berechneten Werten für die Verstärkung.

Der Frequenzgang der beiden Kanäle folgt in allen Phasen dem berechneten Frequenzgang. Im Bereich der tiefen Frequenzen sind die Abweichungen primär auf Vernachlässigungen der Kopplungshochpässe(R405/C403 bzw. R420/C412) sowie den Grenzfrequenzen der Überbrückung aller Kathodenwiderstände, die sich bei niedrigen Frequenzen in einer steigenden Dämpfung bemerkbar macht.