

## **VI. Gleichspannungsverstärker (Direktgekoppelte Widerstandsverstärker)**

### **1. Einleitung**

Durch entsprechend große Bemessung des Kopplungskondensators  $C_K$  eines  $RC$  Verstärkers kann man seine untere Übertragungsgrenze beliebig weit nach unten verschieben. Dieses Verfahren hat aber einmal den Nachteil, daß die eingebauten großen Zeitkonstantenglieder aus  $C_K$  und  $R_i$  den Verstärker bei einer eingetretenen Übersteuerung und Aufladung von  $C_K$  durch Gitterstrom für mehrere Sekunden blockieren und ein Arbeiten mit ihm während dieser Zeit unmöglich machen; zum anderen wird ein solcher Verstärker auf Grund unerwünschter Rückkopplungen über den Innenwiderstand der Stromversorgungsquelle im Zusammenwirken mit den großen Koppelkapazitäten leicht instabil. Im Bereich sehr tiefer Frequenzen kommt er in eine Art Selbsterregung, die sich in einem „blubbernden“ Geräusch äußert. Diese Erscheinung läßt sich meistens nur unter erheblichem Aufwand an Siebmitteln für die Anodenspannung der Eingangsröhre vermeiden. Ein direkt-

gekoppelter Widerstandsverstärker zeigt diese Nachteile nicht; er bleibt immer betriebsklar und ermöglicht zugleich neben der Verstärkung ganz tiefer Frequenzen die Verstärkung von Gleichspannungen und -strömen.

Gleichstromverstärker spielen in der Meß- und Regeltechnik eine wichtige Rolle. Hier müssen oft sehr langsame Änderungen oder die Absolutwerte von kleinen Gleichströmen und Gleichspannungen angezeigt, registriert und ausgewertet werden. Sofern es sich dabei nur um die Anzeige solcher kleinen Ströme und Spannungen handelt, stehen hierfür in den Spiegelgalvanometern außerordentlich empfindliche und genaue Meßwerke zur Verfügung. Doch sind diese Instrumente nicht für einen robusten Betrieb geeignet. Auch können sie die kleinen Gleichströme und -spannungen nicht verstärken und sie auf solche Werte bringen, wie sie beispielsweise ein Katodenstrahloszillograf zur Strahlablenkung oder ein Steuergerät zur Auslösung eines Steuervorganges benötigt. Sobald es sich im Bereich niedrigster Frequenzen um die Erzeugung von Leistungen handelt, werden Gleichstrom- oder Gleichspannungsverstärker erforderlich [9; 16; 17].

Gleichspannungsverstärker in Form direktgekoppelter Widerstandsverstärker übertragen nicht nur die Frequenz Null der Gleichspannung oder die ganz tiefen, mittleren und hohen Frequenzen des NF-Bereiches. Bei geschickter Auslegung sind sie – gleich einem Breitbandverstärker – in der Lage, alle Frequenzen bis hinauf zu einer sehr hochgelegenen und nur durch die Schalt- und Röhrenkapazitäten bestimmten Grenzfrequenz zu verstärken. Hinsichtlich der Stabilität ihrer Verstärkung und ihres Nullpunktes bereiten Gleichspannungsverstärker dem RC-Verstärker gegenüber bedeutende Schwierigkeiten. Während im RC-Verstärker die Arbeitspunkte der einzelnen Stufen wegen der gleichspannungsmäßigen Entkoppelung und Isolierung jeder Stufe völlig unabhängig voneinander sind, hängen die Arbeitspunktdaten der Röhren eines Gleichspannungsverstärkers stark von den Betriebswerten der vorhergehenden Röhren ab. Kleine Schwankungen der Betriebsspannungen und -ströme der ersten Röhrenstufe machen sich, wenn man nicht in Form von Brücken- und Gegentaktanordnungen besondere Kompensationsvorrichtungen vorsieht, um den Gesamtverstärkungsfaktor vervielfacht, in der Endstufe bemerkbar; gleichzeitig machen sie damit einen stabilen Nullabgleich unmöglich.

## 2. Loftin-White-Schaltung

Die bekannteste und einfachste Schaltung eines Gleichspannungsverstärkers ist die von Loftin-White. Sie ist im Bild 192 in Form einer dreistufigen Röhrenkaskade dargestellt. Diese Schaltung benötigt nur eine Gleichspannungsquelle, aber mit vielen Anzapfungen und recht hohem Gesamtspannungswert. Denn da das Gitter der jeweils nachfolgenden Röhre immer auf dem Potential der Anode der vorangehenden Röhre liegt und die Katode der nachfolgenden Röhre jeweils um die Gittervorspannung dieser Röhre positiver sein muß, steigen die Katodenpotentiale und damit die Anodenpotentiale von Stufe zu Stufe.

Die im Bild 192 eingetragenen Spannungen und Widerstände sind Richtwerte; sie könnten in dieser Größe beispielsweise der Röhre ECC 82 zugeordnet sein. Bei 14fachen Verstärkung der ersten Stufe werden  $U_x$ -Spannungen von maximal 10 mV am Gitter der zweiten Röhre mit 140 mV erscheinen. Diese Steuerspannung ist noch so gering, daß man die zweite Röhre in dem gleichen Arbeitspunkt wie die erste arbeiten lassen kann. Daraufhin wird sie dieselbe Stufenverstärkung von etwa 14 zeigen und folglich an das Gitter der dritten Röhre eine Wechselspannung oder

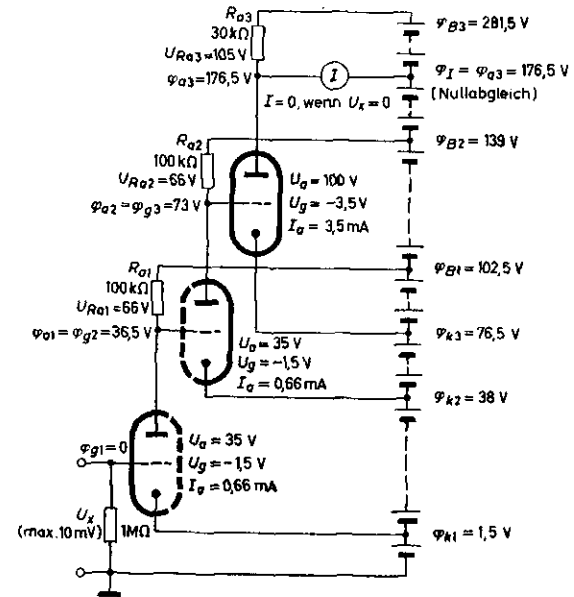


Bild 192. Direktgekoppelter Gleichspannungsverstärker in Kaskadenschaltung (Loftin-White-Schaltung)

Gleichspannungsänderung von  $14 \cdot 140 \text{ mV} \approx 2 \text{ V}$  abgeben. Soll diese Röhre durch die Steuerspannung von 2 V nicht ins Anlaufgebiet des Gitterstroms angesteuert werden, so muß sie eine Vorspannung von etwa  $-3.5 \text{ V}$  erhalten. Bei einer geschätzten Verstärkung von  $v_3 = 10$  treten auf der Anodenseite Wechselspannungen oder Gleichspannungsänderungen von etwa  $\pm 20 \text{ V}$  auf. Damit sie unverzerrt bleiben, muß die Anodenspannung der dritten Röhre etwa 100 V betragen. Nach dem Kennlinienfeld der ECC 82 (Bild 31) gehört zu  $U_g = -3.5 \text{ V}$  und  $U_a = 100 \text{ V}$  ein Anodenstrom von  $I_a \approx 3.5 \text{ mA}$ . Um eine Verstärkung von rund 10 zu erhalten, muß der Anodenwiderstand wenigstens  $30 \text{ k}\Omega$  groß gewählt werden. Dies bedeutet, daß an dem Widerstand eine Spannung von  $30 \text{ k}\Omega \cdot 3.5 \text{ mA} = 105 \text{ V}$  abfällt. Wie den eingetragenen Potentialzahlen entnommen werden kann, benötigt die Kas-

kadenschaltung eine Gesamtbatteriespannung von  $U_B \approx 280 \text{ V}$ ; dabei zeigt sie eine Gesamtverstärkung von  $v_{ges} = 14 \cdot 14 \cdot 10 \approx 2000$ .

### 3. Gleichspannungsverstärker mit Potentiometerkopplung

Mit geringerer Gesamtspeisespannung kommt man aus, wenn man zwischen die Anoden der einen und die Gitter der nachfolgenden Röhren Gegenbatterien schaltet. Sie setzen das Potential von dem hohen Wert der jeweiligen Anode zum Gitter der nachfolgenden Röhre hin auf einen niedrigen Wert herunter, so daß die Katodenpotentiale nicht mehr dauernd aufgestockt zu werden brauchen. Die Gegenbatterien übertragen wegen ihres verschwindend kleinen Wechselstrom-Innenwiderstandes alle Wechselspannungen und Gleichspannungsänderungen ungeschwächt

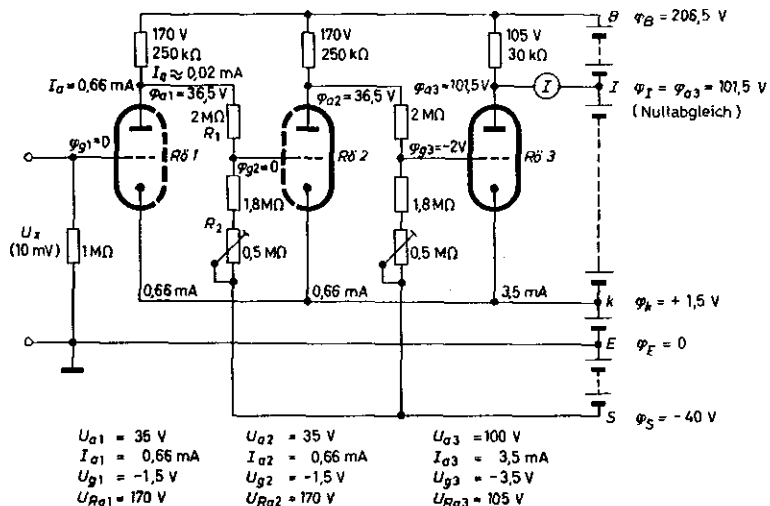


Bild 193. Gleichspannungsverstärker mit Potentiometerkopplung

auf das Steuergitter der nachfolgenden Röhre. An die Stelle der Gegenbatterien können auch Glimmstabilisatoren und Zenerdioden treten. In der Praxis wird, um die aufwendigen Hilfsbatterien einzusparen und um der Einfachheit der Schaltung willen, meistens eine Potentiometerschaltung nach Bild 193 benutzt. Der Spannungsteiler liegt auf der einen Seite an der Anode der Vorröhre und auf der anderen Seite am negativen Pol einer Sonderbatterie  $U_s$ . Der Abgriff führt an das Gitter der nachfolgenden Röhre. Die Spannungsteilerwiderstände  $R_1$  und  $R_2$  und die Sonderbatterie mit ihrer Spannung  $U_s$  müssen so beschaffen sein, daß das Gitter die erforderliche Vorspannung erhält. Bei der mathematischen Formulierung dieser Bedingung geht man davon aus, daß sich zwischen den Widerständen und den Span-

nungen an ihnen beziehungsweise den Potentialen der einzelnen Schaltungspunkte folgende Beziehung aufstellen läßt:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_{R_2}}{U_{R_1 + R_2}} = \frac{\varphi_{g2} - \varphi_s}{\varphi_{a1} - \varphi_s} = \frac{\varphi_{g2} - \varphi_{k2} + \varphi_{k2} - \varphi_E + \varphi_E - \varphi_s}{\varphi_{a1} - \varphi_{k1} + \varphi_{k1} - \varphi_E + \varphi_E - \varphi_s}$$

$$= \frac{(\varphi_{g2} - \varphi_{k2}) + (\varphi_{k2} - \varphi_E) + (\varphi_E - \varphi_s)}{(\varphi_{a1} - \varphi_{k1}) + (\varphi_{k1} - \varphi_E) + (\varphi_E - \varphi_s)}$$

Beachtet man, daß die Katodenpotentiale  $\varphi_{k1}$  und  $\varphi_{k2}$  gleich groß sind und daher für  $\varphi_{k2}$  auch  $\varphi_{k1}$  geschrieben werden kann, erhält man die Beziehung

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_{g2} + U_{g1} + U_s}{U_{a1} + U_{g1} + U_s} \quad (172)$$

Aus ihr läßt sich, wenn die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  nach wechselstromtechnischen Gesichtspunkten ausgewählt wurden, die erforderliche Spannung  $U_s$  der Sonderbatterie errechnen oder aber, wenn  $U_s$  festliegt, das aus gleichstromtechnischen Gründen erforderliche Teilverhältnis der Widerstände ermitteln.

Wenn an der Anode von  $Rö 1$  eine Spannungsänderung von  $\Delta U_{a1}$  auftritt, gilt in bezug auf die Spannungsänderungen  $\Delta U_{g2}$  am Gitter von  $Rö 2$  die Beziehung

$$\frac{\Delta U_{g2}}{\Delta U_{a1}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

oder

$$\Delta U_{g2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Delta U_{a1} \quad (173)$$

Dies folgt aus Gl. (172), wenn man beachtet, daß die Vorspannung  $U_{g1}$  und die Spannung  $U_s$  der Sonderbatterie konstant sind und daher keine  $\Delta U$ -Werte aufweisen. Die Beziehung in Gl. (173) besagt, daß in der Potentiometerschaltung von der an der Anode von  $Rö 1$  auftretenden Änderung  $\Delta U_{a1}$  nur ein Bruchteil als Steuerspannung an die zweite Röhre weitergegeben wird. Nach der Verstärkung in der einen Röhre erfährt somit das Signal durch die Potentiometerschaltung auf dem Wege zum Gitter der nachfolgenden Röhre eine Schwächung. Die Schwächung ist nach Gl. (173) um so geringer, je größer  $R_2$  gegenüber  $R_1$  ist. Ein großer Widerstand  $R_2$  setzt aber eine große Spannung  $U_s$  der Sonderbatterie voraus. Wählt man beispielsweise  $R_2 = R_1$ , läßt man demnach eine Schwächung um den Faktor 2 zu, so wird nach Gl. (172), wenn man in ihr die relativ sehr kleinen Vorspannungswerte  $U_{g1}$  und  $U_{g2}$  gegenüber  $U_s$  vernachlässigt und näherungsweise

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx \frac{U_s}{U_{a1} + U_s}$$

setzt,

$$\frac{U_s}{U_{a1} + U_s} \approx \frac{1}{2}$$

oder

$$U_s \approx U_{a1}$$

Soll die Schwächung geringer ausfallen, so muß  $R_1$  größer gewählt werden. Dann wird aber  $U_x > U_a$ .

In der Schaltung nach *Bild 193* sind für die drei Röhren die gleichen Arbeitspunkt-werte wie im *Bild 192* vorgesehen. Legt man, um die Anzahl der Anzapfungen der Batterie zu reduzieren, die Anoden der beiden ersten Röhren mit an die volle Batteriespannung von 206,5 V an, so müssen die Anodenwiderstände  $R_{a1}$  und  $R_{a2}$  mit rund 250 k $\Omega$  gewählt werden, damit an ihnen bei einem Anodenstrom von 0,66 mA und einem Querstrom von  $I_q = (36,5 + 40) \text{ V} / 4 \text{ M}\Omega \approx 20 \mu\text{A}$  ein Spannungsfall von etwa 170 V auftritt und die Röhren mit 35 V Anodenspannung arbeiten. Um die Vorspannungen genau einstellen zu können, ist der Widerstand  $R_2 = 2 \text{ M}\Omega$  in einen festen von 1,8 M $\Omega$  und einen regelbaren von 0,5 M $\Omega$  aufgeteilt. Wird die Spannung der Sonderbatterie so gewählt, daß das Potential  $\varphi_c$  ihres negativen Endes um so viel negativer wird, als das Potential  $\varphi_a$  der Anode positiv ist, wird also  $-\varphi_c = \varphi_{a1} = U_{a1} + \varphi_{k1} = 35 \text{ V} + 1,5 \text{ V} = 36,5 \text{ V}$  gewählt, so müssen in der ersten Koppelstufe  $R_1$  und  $R_2$  genau gleich groß sein, wenn das Gitter von  $R_2$  auf das Potential von 0 V gebracht werden und damit um 1,5 V negativer als die Katode sein soll.

Da die dritte Röhre ein Gitterpotential von  $-2 \text{ V}$  verlangt, damit die Vorspannung  $-3,5 \text{ V}$  wird, muß hier das 500-k $\Omega$ -Potentiometer auf etwas weniger als 0,2 M $\Omega$  eingeregelt werden. Im ganzen ergibt sich in dieser Schaltung, obgleich die Röhren in den gleichen Arbeitspunkten wie in der Schaltung nach *Bild 192* arbeiten und damit für sich allein etwa die gleiche Verstärkung zeigen, eine geringere Verstärkung. Dies hängt mit der zweimaligen Schwächung um je den Faktor 2 durch die Potentiometer zusammen. Die Gesamtverstärkung hat, wenn man die Eigenverstärkung der beiden ersten Röhren wegen des höheren Anodenwiderstandes zu 14,5 statt 14 ansetzt, den Wert

$$v_{\text{ges}} \approx 14,5 \cdot 0,5 \cdot 14,5 \cdot 0,5 \cdot 10 \approx 520$$

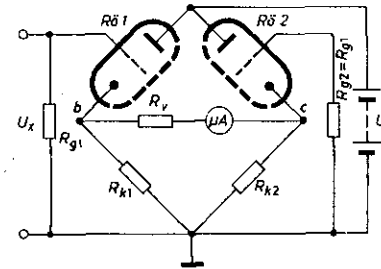
Die vorliegende Schaltung benötigt dafür eine etwas kleinere Batteriespannung von im ganzen 206,5 V + 40 V  $\approx$  250 V.

Den beiden bis jetzt besprochenen Schaltungen haftet der große Mangel an, daß sich geringe Schwankungen in den Betriebsströmen und -spannungen der ersten Stufen in der Endstufe um den jeweiligen Verstärkungsfaktor vergrößert auswirken. Ändert sich beispielsweise durch Röhrenalterung der Anodenstrom der ersten Röhre, so ändert sich der Spannungsfall über dem Anodenwiderstand dieser Röhre und damit auch das Gitterpotential der zweiten Röhre. Da sie nicht entscheiden kann, ob die Schwankung von einer tatsächlichen  $U_x$ -Änderung oder einer Störung kommt, meldet sie die Änderung um ihren Verstärkungsfaktor vergrößert an die nächste Stufe und von dort noch einmal verstärkt an die Endstufe weiter. Dadurch wird, obgleich  $U_x$  konstantgeblieben ist, eine Änderung in der Anzeige hervorgerufen. Der Nullpunkt verschiebt sich, er ist nicht stabil. Eine gute Stabilisierung des Nullpunktes setzt voraus, daß der direktgekoppelte Widerstandsverstärker aus einer bis aufs äußerste konstantgehaltenen Spannungsquelle gespeist wird. Daneben

müssen zur Vervollständigung der Stabilisierung des Nullpunktes und der Verstärkung weitere Maßnahmen ergriffen werden. Sie bestehen in der Anwendung starker Gegenkopplungen und in der Symmetrierung der ganzen Schaltung. Durch Gegenkopplung wird die Verstärkung konstantgehalten; die Symmetrierung sorgt dafür, daß sich Störspannungsgrößen, die durch Betriebschwankungen entstanden sind, innerhalb der Schaltung kompensieren, dagegen die äußere, zu messende  $U_x$ -Spannung ihre volle Verstärkung erfährt. Am besten eignen sich zur Symmetrierung Brückenschaltungen und Gegentaktschaltungen.

#### 4. Brückenschaltung eines Gleichspannungsverstärkers

Die Prinzipschaltung eines in Form einer Brücke aufgebauten einstufigen Gleichspannungsverstärkers zeigt *Bild 194*. Die Brücke besteht aus den Katodenwiderständen  $R_{k1}$  und  $R_{k2}$  und den Röhren  $R_1$  und  $R_2$ . Die Katodenwiderstände sind



*Bild 194.* Prinzip eines einstufigen Gleichspannungsverstärkers in Brückenschaltung

gleich groß und sorgen dafür, daß die Katoden den Gittern gegenüber positiv vorgespannt sind. Sie haben in dieser Schaltung im Gegensatz zu den folgenden ganz normale Werte zwischen 100 und 2000  $\Omega$ . In der einen Brückendiagonale liegt das empfindliche Drehspulinstrument, in der anderen wirkt die Batteriespannung  $U_B$ . Das Gitter von  $R_2$  ist über  $R_{g2} = R_{g1}$  an Masse gelegt. Auch das Gitter von  $R_1$  liegt, solange keine Spannung  $U_x$  auftritt, auf Massepotential. Sind die Röhren gleichartig und in ihrem Kennlinienverlauf genau übereinstimmend, so ist die Brücke im Zustand  $U_x = 0$  abgeglichen. Die Röhren führen gleiche Ströme, die an  $R_{k1}$  und  $R_{k2}$  gleich große Katodenspannungen hervorrufen und somit den Punkten  $b$  und  $c$  gleiches Potential erteilen. Durch das Instrument fließt kein Strom. Die Gleichheit der Arbeitspunkte und Kennlinien der beiden Systeme ist weitgehend gewährleistet, wenn sie als Doppeltriode in einem Röhrenkolben untergebracht sind und einen gemeinsamen Heizfaden haben.

Wird an das Gitter von  $R_1$  eine kleine positive oder negative Spannung  $U_x$  gelegt, ändert sich der Anodenstrom dieser Röhre und damit auch ihre Katodenvorspannung; es ändert sich also das Potential von  $b$ . Hierdurch kommt die Brücke aus dem Gleichgewicht, und der Zeiger des Instrumentes schlägt aus. Die zu messende Spannung  $U_x$  ändert gewissermaßen den Gleichstromwiderstand von  $R_1$  und

verstimmt dadurch die Brücke. Die Größe des Instrumentenstromes ist ein Maß für die angelegte Spannung und ist ihr nach Maßgabe der Kennlinienlinearität streng proportional. Polt man die Eingangsspannung um, so fließt in der Instrumentendiagonale ein umgekehrter Strom.

Schaut man sich die Röhrenzweige mit ihren Katodenwiderständen auf die Art der verwendeten Grundschialtung hin an, so erkennt man, daß es sich hier um eine Anodenbasisschialtung oder einen Katodenverstärker handelt. Die Anode liegt unabhängig vom Anodenstrom und seiner Änderung, da kein  $R_a$  vorhanden ist, auf dem konstanten Potential  $\varphi_B$  der Speisebatterie. Ein Katodenverstärker hat, wie im Abschnitt B.IV.3. nachgewiesen wurde, eine Verstärkung kleiner als Eins. Die Verstärkung kommt nach Gl. (161) um so mehr an den Wert 1 heran, je größer die Katodenwiderstände gegenüber dem wirksamen Innenwiderstand  $R'_i \approx 1/S$  der Anodenbasisschialtung sind. Der niederohmige Ausgang der einzelnen Röhrenstufe besagt, daß die Schaltung gleichzeitig als Impedanzwandler arbeitet. Die an  $R_{k1}$  auftretenden Spannungsänderungen  $\Delta U_{k1}$  sind zwar nicht größer als die Eingangsspannung, strenggenommen sogar kleiner als  $U_x$ , aber sie stammen aus einem Generator mit dem sehr niederohmigen Innenwiderstand  $1/S$ . Der Schaltung kann dadurch an dieser Stelle eine wesentlich größere Leistung entnommen werden, als sie eingangsseitig an  $R_{p1}$  und dem Gitter zur Verfügung steht. Dementsprechend kann hier ein robusteres Instrument zur Anzeige benutzt werden. Die Stromgegenkopplung sorgt im übrigen für eine weitgehende Unabhängigkeit der Schaltung gegenüber Nichtlinearitäten und Schwankungen in den Betriebsdaten der Röhren.

Auch die Vergleichsröhre 2 arbeitet in Anodenbasisschialtung. Man kann auch sagen, sie arbeitet in Gitterbasisschialtung, weil ihr Gitterpotential praktisch festliegt, bei direkter Erdung sogar absolut fest. Auf jeden Fall zeigt auch dieser Röhrenzweig zwischen Katode und Masse nur einen kleinen elektronischen Eingangswiderstand  $R_{e2}$  von etwa  $1/S_2$ . Wechselstrommäßig schließt er den ohmschen Katodenwiderstand  $R_{k2}$  praktisch kurz. Diese Widerstandsverhältnisse, die in der Ersatzschaltung vom Bild 195 zusammengestellt sind, lassen es verständlich scheinen, daß sich die Potentialänderungen  $\Delta \varphi_{k1} = v U_x \approx U_x$  nur zu einem ganz geringen Bruchteil am

größer der Instrumenten- oder Vorwiderstand  $R_o$  gegenüber der Parallelschialtung von  $R_{k2}$  und  $R_{e2} \approx 1/S_2$  ist. Je stabiler das Potential  $\varphi_c$  ist, das heißt, je geringer die Potentialschwankungen

$$\Delta \varphi_c = \Delta U_{k2} \approx U_x \frac{\frac{1}{S_2}}{\frac{1}{S_2} + R_o}$$

sind, desto mehr Spannung steht für die Instrumentenanzeige zu Verfügung.

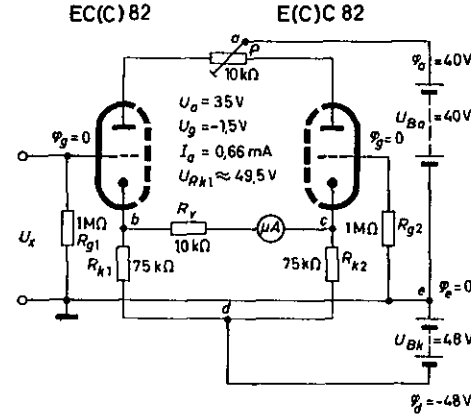


Bild 196. Einstufiger Gleichspannungsverstärker in Brückenschialtung mit Abgleichpotentiometer  $P$  in der Anodenzuleitung und großen Katodenwiderständen

Die Brückenschialtung gibt eine gute Nullpunktsicherheit. Bei Schwankungen in der Stromversorgung wandert der Nullpunkt um so weniger, je besser die beiden Röhren in ihren Kennlinien und damit in ihren Gleichstromwiderständen übereinstimmen. Zum Ausgleich kleiner Unterschiede in den Röhrendaten kann entweder nach Bild 196 in die Anodenzuleitung oder nach Bild 197 in die Katodenzuleitung ein kleines Potentiometer eingesetzt werden.

Verwendet man in diesen Schaltungen große Katodenwiderstände von beispielsweise  $75 \text{ k}\Omega$ , um die Verstärkung möglichst nahe an Eins heranzubringen und eine große Stromkopplung zu erhalten, durch die dann die Schaltung gegen alle störenden Einflüsse gut stabilisiert wird, so treten an den Widerständen große Gleichspannungsfälle auf. Um sie, das heißt um  $U_k - U_g$ , muß das Potential des Punktes  $d$  gegenüber Masse oder Erde ins Negative verschoben werden, denn die Steuergitter liegen im Ruhezustand nach wie vor auf Massepotential. Wird beispielsweise die Doppeltriode ECC 82 benutzt und werden ihre Arbeitspunktdata genauso wie in der ersten Stufe vom Bild 192 gewählt, so bilden sich bei  $I_a = I_k = 0,66 \text{ mA}$  an den  $75 \text{ k}\Omega$  großen Katodenwiderständen Spannungen von  $49,5 \text{ V}$  aus. Da die Gitter auf Massepotential liegen und dementsprechend bei  $1,5 \text{ V}$  Vorspannung die Katoden auf das Potential  $\varphi_k = \varphi_c = +1,5 \text{ V}$  gelegt werden müssen, ist dem Punkt  $d$

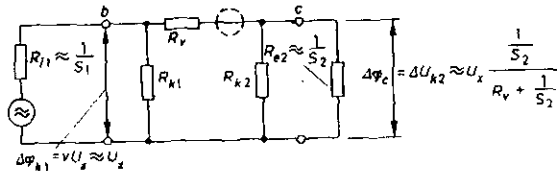


Bild 195. Ersatzschaltung für die Speisung des Instrumentendiagonalzweiges im Bild 194

Punkt  $c$  bemerkbar machen. Die Katode von  $Rö 2$  schwankt in ihrem Potential verschwindend wenig, wenn an der Katode von  $Rö 1$  und damit über  $R_{k1}$  Spannungsschwankungen auftreten.  $\varphi_{k2}$  ist nach dem Ersatzschaltbild um so konstanter, und  $Rö 2$  arbeitet in der Brückenschialtung um so besser als reine Vergleichsröhre, je

das Potential  $\varphi_d = \varphi_b - U_{Bd} = \varphi_b - U_{Rk} = +1,5 \text{ V} - 49,5 \text{ V} = -48 \text{ V}$  zu erteilen. Dies bedeutet, daß der Spannung der Katodenbatterie ein Wert von  $U_{Bk} = 48 \text{ V}$  zu erteilen ist.

Aus der Anodenspannung von  $35 \text{ V}$  für den vorgesehenen Arbeitspunkt und dem Spannungsfall von  $0,66 \text{ mA} \cdot 5 \text{ k}\Omega = 3,3 \text{ V}$  über dem Potentiometer  $P$  in Mittel-

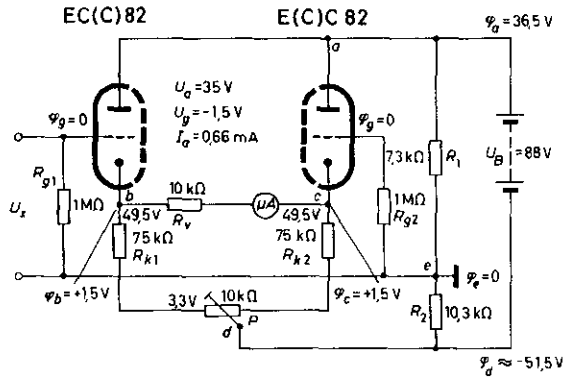


Bild 197. Einstufiger Gleichspannungsverstärker in Brückenschaltung mit Abgleichpotentiometer  $P$  in der Katodenzuleitung

stellung folgt, daß der Punkt  $a$  das Potential  $\varphi_a = \varphi_k + U_a + U_p = 1,5 \text{ V} + 35 \text{ V} + 3,3 \text{ V} \approx 40 \text{ V}$  annehmen und die Anodenbatterie eine Spannung von  $U_{Ba} = 40 \text{ V}$  haben muß; die gesamte Speisespannung erhält dann einen Wert von  $U_{Ba} + U_{Bk} = 88 \text{ V}$ .

Anstatt wie im Bild 196 die Gesamtbatterie anzuzapfen und die Anzapfstelle  $e$  zu erden, kann eine entsprechende Potentiometerschaltung aus zwei Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  verwendet werden. Von dieser Möglichkeit ist im Bild 197 Gebrauch gemacht worden. Hier ist außerdem das Symmetrierpotentiometer aus der Anodenzuleitung in die Katodenzuleitung verlegt worden. Bei einem angenommenen Querstrom von  $5 \text{ mA}$  für  $R_1$  und  $R_2$  ergibt sich – da über  $R_1$   $36,5 \text{ V}$  und über  $R_2$   $51,5 \text{ V}$  abfallen müssen – für  $R_1$  ein Wert von  $36,5 \text{ V}/5 \text{ mA} = 7,3 \text{ k}\Omega$  und für  $R_2$  ein Wert von  $51,5 \text{ V}/5 \text{ mA} = 10,3 \text{ k}\Omega$ .

### 5. Gleichspannungsverstärker in Gegentaktschaltung

Die beschriebene Brückenschaltung wird oft als Eingangsstufe eines mehrstufigen Gleichspannungsverstärkers in Gegentaktschaltung benutzt; sie hat hier dann nur die Aufgabe der Impedanzwandlung. Man erwartet von ihr keine Spannungsverstärkung, sondern lediglich, daß sie die zu messende Spannungsquelle nicht belastet und den nachgeschalteten, eigentlichen Spannungsverstärker niederohmig speist. Wie ein Vergleich zwischen der Eingangsstufe des Gegentaktverstärkers im

Bild 198 und der Brückenschaltung in Bild 197 erkennen läßt, handelt es sich in beiden Fällen um genau die gleiche Schaltung. Der einzige Unterschied liegt in der Dimensionierung der Widerstände, die sich nach der Höhe der gewählten Betriebsspannung zu richten hat.

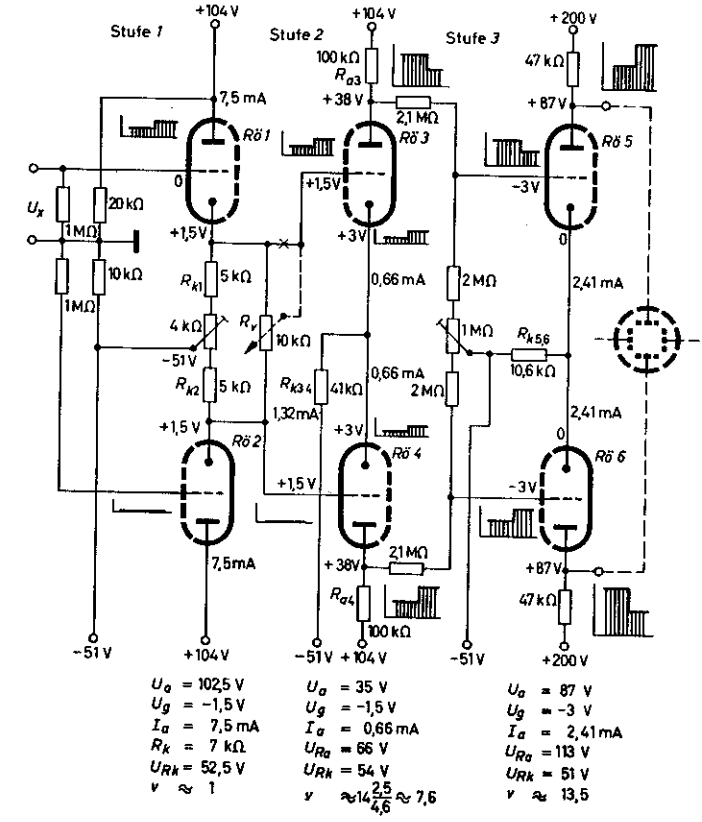


Bild 198. Prinzipschaltung eines Gegentaktgleichspannungsverstärkers (Bei Regelung der Verstärkung ist die gestrichelte Verbindung einzuführen und bei  $x$  aufzutrennen. Die eingetragenen Spannungswerte sind Potentiale, bezogen auf die Masse mit dem Potential Null)

Für die erste Stufe ist die gleiche Batteriespannung wie für die zweite Stufe vorgesehen. Da die zweite Stufe in normaler Katodenbasisschaltung arbeitet, benötigt sie nach der Röhrentabelle (ECC 82) bei einem Anodenwiderstand von  $100 \text{ k}\Omega$ , wie in der Schaltung von Bild 192, eine Batteriespannung von annähernd  $104 \text{ V}$ . Die zweite und dritte Stufe sind als Gegentaktstufe ausgebildet.

Die an dem Widerstand  $R_{k1}$  der Eingangsstufe auftretenden und zu verstärkenden Potentialänderungen werden direkt – gegebenenfalls bei Regelung der Verstärkung durch Abgriff am Widerstand  $R_v$  – auf das Gitter von  $Rö\ 3$  übertragen. Da sich das Katodenpotential von  $Rö\ 2$ , wie oben begründet wurde, praktisch nicht ändert, liegt das Gitter von  $Rö\ 4$  auf dem praktisch konstanten Potential von etwa 1,5 V. Die gegentaktige Aussteuerung dieser Röhre erfolgt über die Katodenkopplung der beiden Röhren 3 und 4. Wenn  $Rö\ 3$  beispielsweise durch einen positiven Spannungssprung am Gitter so angesteuert wird, daß ihr Katodenstrom  $I_{k3}$  und damit auch die Spannung am gemeinsamen Katodenwiderstand  $R_{k34}$  zunimmt, dann verschieben sich die Potentiale der Katoden von  $Rö\ 3$  und 4 in positiver Richtung. Für  $Rö\ 3$  bedeutet dies eine Gegenkopplung und für  $Rö\ 4$  eine Vergrößerung ihrer negativen Gittervorspannung und damit eine Abnahme ihres Katodenstromes. Es ist also so, daß ein positiver Spannungssprung am Eingang des Verstärkers in  $Rö\ 3$  eine Vergrößerung und in  $Rö\ 4$  eine Verkleinerung des Anodenstromes bewirkt. Die Anodenspannungssprünge verlaufen damit entgegengesetzt; hierin besteht das gegentaktige Verhalten und Arbeiten der beiden Röhren der zweiten Stufe.

Die entgegengesetzt gerichteten Änderungen der Katodenströme haben zur Folge, daß der resultierende Spannungsfall am gemeinsamen Katodenwiderstand  $R_{k34}$  kleiner wird. Würde der Rückgang im Katodenstrom von  $Rö\ 4$  genau dem Anstieg des Katodenstromes von  $Rö\ 3$  entsprechen, so bliebe der resultierende Katodenstrom absolut konstant. Dies ist aber praktisch nicht möglich, denn dann würde sich ja an  $R_{k34}$  keine Spannungsänderung ausbilden und als Folge davon zwischen Gitter und Katode von  $Rö\ 4$  keine Steuerspannung entstehen. In diesem Fall bestünde für den Katodenstrom von  $Rö\ 4$  nicht der geringste Anlaß, sich zu ändern. Mit dem Wegfall der Kompensationswirkung von  $\Delta I_{k4}$  würden die Katodenstromänderungen von  $Rö\ 3$  aber sofort an  $R_{k34}$  wieder neue Spannungsschwankungen hervorrufen. Es läßt sich zeigen, daß die Katodenstromänderungen der beiden Röhren nie genau gleich groß sind und sich daher nie völlig ausgleichen. Die Eingangsspannung  $U_x$  wird an  $R_{k34}$  immer gewisse Spannungsverschiebungen hervorrufen, die allerdings kleiner als ohne die Gegentaktröhre 4 sein werden.  $Rö\ 3$  stört dies nicht; für sie bedeutet es lediglich eine Abnahme der Gegenkopplung.  $Rö\ 4$  wird im ganzen etwas schwächer als  $Rö\ 3$  angesteuert. Die Anodenspannungsänderungen von  $Rö\ 3$  und 4 weisen damit stets eine kleine Unsymmetrie auf. Die Unsymmetrie bleibt klein, wenn das Produkt  $S R_{k34}$  groß gegen Eins ist. Sie wird im übrigen in den nachfolgenden Verstärkerstufen laufend verkleinert, da diese zusätzlich zur gegentaktigen Gitteransteuerung mit einer gewissen Katodenkopplung arbeiten. Es zeigt sich, daß die Röhre mit den größeren Gitterspannungsschwankungen über ihre größeren Katodenstromänderungen und Spannungsschwankungen am gemeinsamen Katodenwiderstand die Röhre mit der geringeren Gitteraussteuerung von der Katodenseite aus mitzieht und mitaussteuert.

Da die erste Röhrenstufe als Impedanzwandler keine Verstärkung hat und in der zweiten Stufe höchstens mit einer Verstärkung von  $v_2$  etwa 10...20 gerechnet werden kann, die durch die nachfolgende Potentiometerschaltung noch heruntergedrückt

wird, hat ein Gleichspannungsverstärker in seiner praktischen Ausführung stets weitere Verstärkerstufen. Von ihnen ist im *Bild 198* nur eine, nämlich die mit den Röhren 5 und 6, gezeichnet. Die einzelnen Stufen werden in den meisten Fällen über Potentiometerschaltungen gekoppelt.

Je höher man in der Verstärkung des Eingangssignals kommt, zu desto größeren negativen Gittervorspannungen muß man übergehen. Damit hierbei brauchbare Verstärkungen zustandekommen, müssen die Batteriespannungen entsprechend erhöht werden. Wenn man die großen Spannungsänderungen, die beispielsweise eine Oszillografenröhre zur Aussteuerung ihres Bildschirms benötigt, der Lage der oberen Grenzfrequenz wegen mit kleinen Anodenwiderständen und nicht zu hohen Batteriespannungen erreichen will, muß man gleichzeitig mit großen Anodenströmen arbeiten. Dies bedingt, daß man zum Aufbau der Endstufen des Verstärkers leistungsfähige, große Röhren verwenden muß, denn nur sie sind in der Lage, außer hohen Spannungen auch große Ströme zu liefern.