

#### 4. VERSTÄRKER FÜR KLEINE LEISTUNGEN

Verstärker für kleine Leistung werden meist in der Endstufe mit Röhren im A-Eintakt-Betrieb betrieben. Dadurch bleibt der Wirkungsgrad klein (unter 50 Prozent), doch kann man das zugunsten der einfachen Schaltung in Kauf nehmen. Wirkungsgrad heißt: Verhältnis der abgegebenen Sprechleistung zur zugeführten Gleichstromleistung (input).

Beim A-Betrieb wird die Röhre symmetrisch um den Arbeitspunkt auf ihrer Kennlinie angesteuert (Bild 34). Auf diese Art arbeiten auch alle Vorverstärkerröhren. Die Verzerrungen sind beim A-Betrieb am geringsten. Bild 35 zeigt die übliche Schaltung für die Eintakt-A-Endstufe. Die Röhre erhält ihre Gittervorspannung über die Katodenkombination  $R_k/C_k$ , ihr Schirmgitter liegt meist an der vollen Batteriespannung. Ein kleiner 100- $\Omega$ /0,1-W-Widerstand in der Schirmgitterleitung unterdrückt eine eventuelle Schwingneigung der steilen Endröhre auf ultrahohen

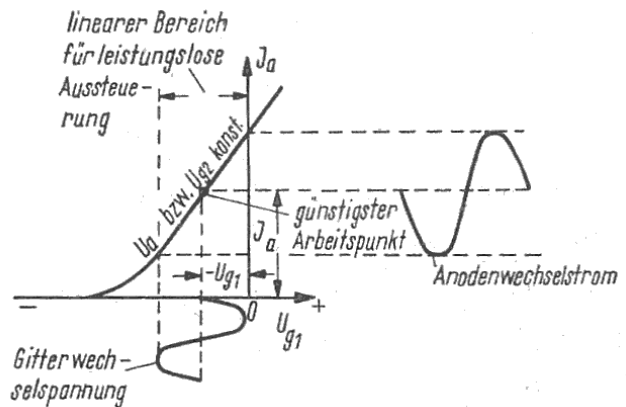


Bild 34. Der Arbeitspunkt der Endstufe im A-Betrieb

Dem gleichen Zweck dient auch der 1- bis 5-k $\Omega$  – Widerstand  $R_d$  in der Gitterleitung. Beide Widerstände sind ohne Einfluß auf die Daten der Stufe.

Der schaltungsmäßige Unterschied der Endstufe gegenüber den Vorstufen ist der Lautsprecherübertrager im Anodenkreis. Der Ohmsche Widerstand seiner Primärwicklung ist relativ gering (einige 100  $\Omega$ ), so daß ein kräftiger Anodengleichstrom fließt. Für den Anodenwechselstrom bildet die Induktivität der Wicklung einen hohen Widerstand, so daß an ihr eine große Wechselspannung abfällt.

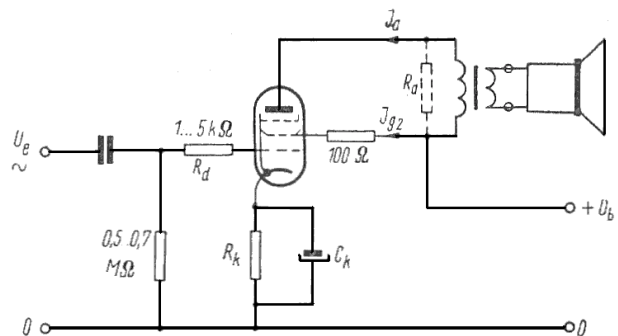


Bild 35. Die Schaltung der Endstufe im A-Betrieb

Tabelle 5: Die Endstufen im A-Eintakt-Betrieb

Röhre	$U_b$ V	$I_a$ mA	$I_{g2}$ mA	$N_{V,max}$ W	$-U_g$ V	$R_k$ $\Omega$	$R_a$ k $\Omega$	$N_a$ W	k %	$U_{e,eff}$ V
E(C)L 82	200	35	7	7	16	380	5,6	3,5	10	6,6
	170	41	8	7	11,5	230	3,9	3,3	10	6
	100	26	5	7	6	200	3,9	1,5	10	3,8
EL 84	250	48	5,5	12	7,5	140	5,5	5,3	10	4,3
EL 86	170	70	22	12	12,5	170	2,4	5,6	10	7
	100	43	11	12	6,7	290	2,4	1,9	10	4,3
EL 95	250	24	4,5	6	9	320	10	3,0	12	5
	200	23	4,2	6	6,3	230	8	2,3	12	4,5
EL 34	265	100	15	27,5 <sup>1)</sup>	13,5	120	2	11	10	8,7
E(C)L 81	200	30	9,6 <sup>1)</sup>	6,5	7	7	2,4	10	3,7	
6 V 6	250	45	7	12	12,5	250	5	4,5	8	9
6 L 6	250	75	7,2	19	14	170	2,5	6,5	10	10

1) Bei Vollaussteuerung.

Die heruntertransformierte Wechselspannung wird an der Sekundärseite des Übertragers abgenommen und dem „Verbraucher“ (meist dem Lautsprecher) zugeführt. Wichtig für das einwandfreie Arbeiten der Endstufen ist ihre Anpassung. Es genügt nämlich nicht, „irgendeinen“ Übertrager zu verwenden, vielmehr muß er den Lautsprecherwiderstand so in den Anodenkreis transformieren, daß ein günstiger Kompromiß zwischen Leistungsabgabe und Verzerrungen entsteht. Hierzu geben die Röhrenhersteller für jede Röhre den günstigsten Außenwiderstand  $R_a$  an. Jede Röhre kann – bedingt durch die vom Hersteller angegebene maximale Verlustleistung  $N_v$  – nur eine bestimmte Leistung  $N_a$  abgeben. Dazu benötigt sie eine bestimmte Gitterwechselspannung  $U_{e\sim}$ , die von der Vorröhre abgegeben werden muß.

Tabelle 5 gibt eine Übersicht über einige Endröhren und ihre Daten im A-Eintakt-Betrieb.

#### 4.1 Die Gegentakt-A-Endstufe

Schaltet man zwei Endröhren so, daß ihre Steuerspannungen, bezogen auf ihre Augenblickswerte, entgegengesetzte Polarität haben, so addieren sich ihre Ausgangsspannungen (Bild 36) – man spricht dann von einer Gegentakt-Endstufe. Die Gegentaktschaltung ist in mancher Hinsicht günstiger als die Parallelschaltung zweier Röhren.

Der Ausgangsübertrager enthält zwei Teilwicklungen, die in entgegengesetzter Richtung von den Anodenruhestromen durchflossen werden. Bei gleichen Ruhestromen ist die Gleichstromvormagnetisierung des Übertragerkernes Null, dieser braucht demzufolge keinen Luftspalt zu enthalten, seine Größe wird nur von der übertragenen Sprechleistung bestimmt.

Es läßt sich zeigen, daß die in der Endröhre entstehenden geradzahigen Oberwellen in der Gegentaktschaltung kompensiert werden – Gegentaktschaltungen sind folglich klirrarmer als Eintaktstufen mit Röhren im gleichen Arbeitspunkt.

Wie baut sich eine Gegentaktendstufe auf? Im Falle des A-Betriebes können wir unsere bisherigen Kenntnisse voll auf die Gegentaktschaltung übertragen. Der Ausgangsübertrager muß für den doppelten primären Anpaßwiderstand ausgelegt sein (nicht die doppelte Windungszahl) und eine Mittelanzapfung auf der Primärseite erhalten. Damit ist die Endstufe fertig, und es bleibt nur übrig, die beiden Steuerspannungen mit entgegengesetzter Polarität herzustellen.

Im allgemeinen ist unsere NF-Spannung unsymmetrisch gegen Erde. Da zwei Spannungen mit entgegengesetzter Polarität gegeneinander um  $180^\circ$  phasenverschoben sind, nennt man Röhrenstufen, die entweder die zweite (phasenverschobene) Spannung oder zwei um  $180^\circ$  verschobene Spannungen liefern, „Phasenumkehrstufen“.

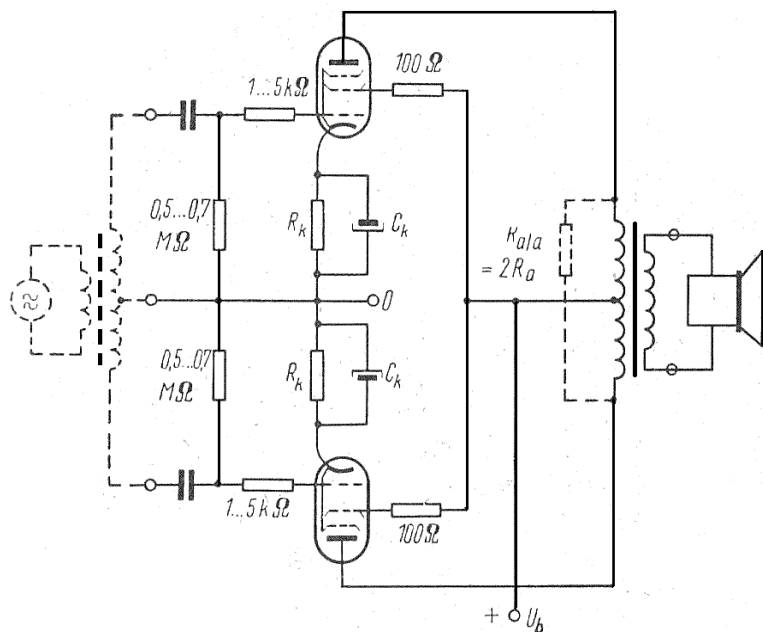


Bild 36. Gegentakt-A-Endstufe,  $R_{a/a}$  ist der doppelte Wert von  $R_a$  in Bild 35

An Phasenumkehrstufen für Gegentaktverstärker werden einige Forderungen gestellt:

Die Beträge der beiden Steuerspannungen müssen bei allen in Frage kommenden Frequenzen gleich groß sein. Beide Spannungen müssen über den gesamten Frequenzbereich gegeneinander um  $180^\circ$

phasenverschoben sein. Oft müssen auch die Quellwiderstände der beiden Steuerspannungen gleich groß sein.

Alle Eigenschaften müssen zeitlich konstant sein, d. h. dürfen sich nicht infolge Alterung, Netzspannungsänderungen usw. (stark) ändern.

Die gebräuchlichsten Phasenumkehrstufen werden im folgenden angegeben.

#### 4.2 Die Katodenschaltung

Die Katodenschaltung ist die einfachste und „sicherste“ Schaltung zur Gewinnung von zwei Gegentakt-Steuerungen. Bild 37 zeigt das Prinzip der Schaltung:

Die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  sind gleich groß, sie dienen als Arbeitswiderstände. An der Katode folgt die Spannung in ihrer Phasenlage der Gitterspannung (wie bei der Anodenbasisstufe). An der Anode ist die Spannung bekanntlich um  $180^\circ$  gegenüber der am Gitter phasenverschoben. Beide Ausgangsspannungen sind demzufolge entgegengesetzt gepolt, und das verlangen wir von einer Phasenumkehrstufe.

Da der Anodenwechselstrom der Röhre (der dem Katodenwechselstrom gleich ist) die beiden gleichen Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  durchfließt, sind auch die Ausgangsspannungen gleich groß. Sie bleiben es auch bei Röhrenwechsel, Alterung usw.

Beide Ausgangswiderstände sind jedoch verschieden groß. Wo das stört, kann man katodenseitig einen Widerstand  $R_v$  (gestrichelt im Bild) einfügen, der etwa gleich groß wie der Innenwiderstand der Röhre ist.

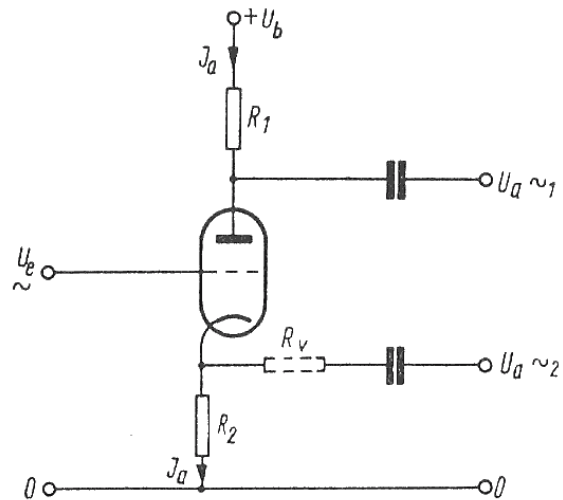


Bild 37. Das Prinzip der Katodyn-Phasenumkehrstufe

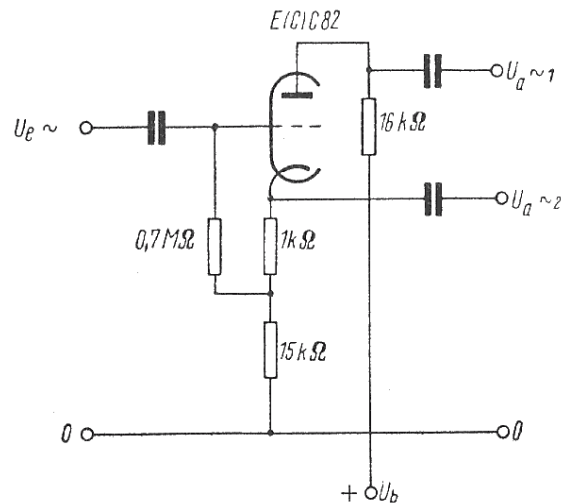
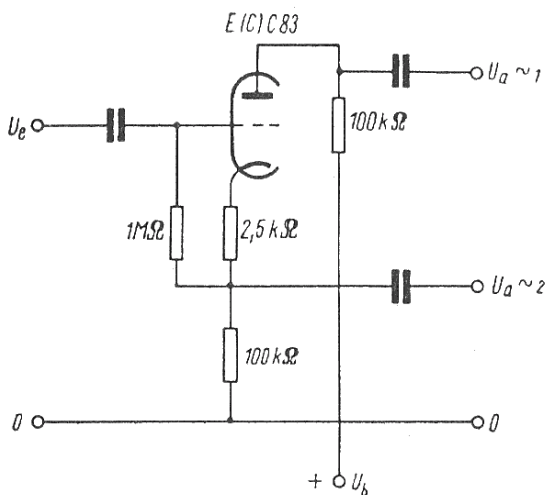


Bild 38 und 39. Katodynstufen mit empfohlenen Werten

Da der Widerstand  $R_1$  für die Röhre eine starke Stromgegenkopplung darstellt, ist die Verstärkung der Stufe (bezogen auf jede Ausgangsspannung) etwa 1 (siehe auch S. 27).

Um möglichst große Ausgangsspannungen zu erhalten, ist man daran interessiert, die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  groß zu machen. Leider ist dies nicht unbegrenzt möglich. Die Röhrenhersteller geben für jede Röhre einen Maximalwert für die Spannung bzw. den Widerstand zwischen Heizfaden und Katode an, der nicht überschritten werden darf. Die Bilder 38 und 39 zeigen praktisch erprobte Katodenschaltungen mit ihren Werten.

### 4.3 Phasendrehende Stufe mit $v = 1$

Eine andere Möglichkeit, von der heute bei allen großen Verstärkern Gebrauch gemacht wird, zeigt Bild 40. Das Röhrensystem  $R\ddot{o}_2$  hat nur die Aufgabe, die Spannung um  $180^\circ$  in ihrer Phase zu drehen und so eine zweite Steuerspannung zu liefern. Es darf die Spannung nicht verstärken, damit die beiden Steuerspannungen gleich groß bleiben. Man erreicht das durch einen Spannungsteiler vor dem Gitter ( $R_1$  bis  $R_3$ ), der die Spannung um so viel teilt, wie sie das Röhrensystem  $R\ddot{o}_2$  verstärkt. Darin liegt die Schwäche der Schaltung. Man kann zwar durch ein Potentiometer die Ausgangsspannung der Phasen-, „dreh“-Röhre genau einstellen, sie ändert sich jedoch unter dem Einfluß von Netzspannungsschwankungen und bei Röhrenalterung. Deshalb stabilisiert man die Verstärkung durch Gegenkopplung, möglichst durch gemeinsamen Katodenwiderstand mit der Vorröhre. Um frequenzabhängige Glieder zu sparen, verwendet man gelegentlich die galvanische Kopplung zur Vorstufe. Bild 41 zeigt eine praktisch ausgeführte Phasendrehstufe mit bewährten Werten.

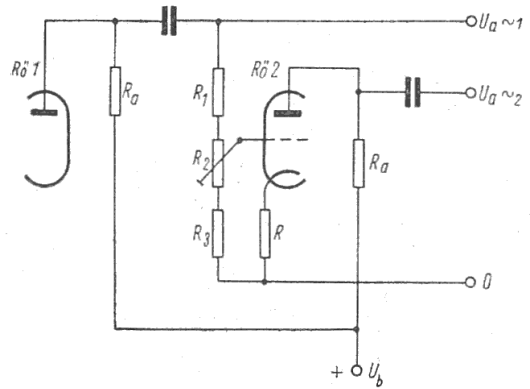
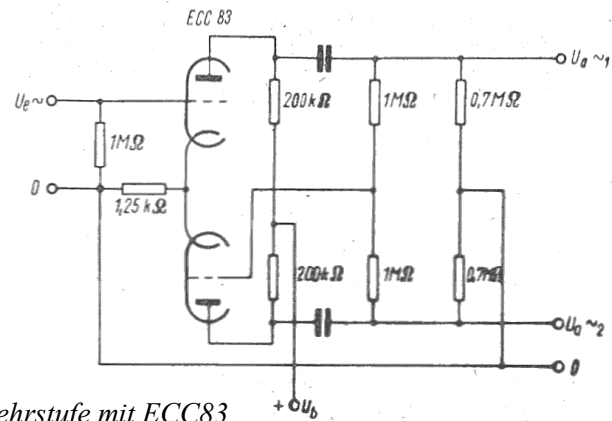


Bild 40. Zum Prinzip der Phasenumkehrstufe mit  $v=1$

Bild 41. Praktisch ausgeführte Phasenumkehrstufe mit ECC83



### 4.4 Die Gegenkopplung im Endverstärker

Heute gibt es keine moderne Endstufe ohne Gegenkopplung. Man erreicht mit ihr die Verminderung des Klirrfaktors, frequenzunabhängigere Ausgangsspannung, geringeren Ausgangswiderstand (bei Spannungsgegenkopplung).

Außerdem vermindert die Gegenkopplung den Einfluß von Kennlinienstreuungen, was bei Gegentaktschaltungen besonders erwünscht ist, da ja hier die Kennlinien beider Endröhren möglichst genau übereinstimmen sollen.

Warum soll eine Endstufe einen möglichst kleinen Innenwiderstand aufweisen? Nun, dieser verhindert das „Hochlaufen“ der Spannung bei – versehentlich – nicht angeschlossener Last (Lautsprecher). Außerdem bedämpft ein kleiner Ausgangswiderstand die Schwingpule des Lautsprechers, die sonst unerwünschte Einschwingvorgänge ausführt.

Es ist im Rahmen dieses Heftes aus Platzgründen leider nicht möglich, hier die Berechnung der Gegenkopplungen bis in alle Einzelheiten zu behandeln.

Die einfachste Spannungsgegenkopplung erfolgt über eine Stufe (meist die Endstufe). Der durch die Gegenkopplung bedingte Verstärkungsrückgang läßt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$v/v' = 1 + \alpha v;$$

$\alpha$  ist hierin das Verhältnis der zur GK verwendeten Ausgangsspannung  $U_{GK}$  zur gesamten Ausgangsspannung  $U_{av}$ . Dieses Verhältnis läßt sich aus dem Spannungsteilerverhält-

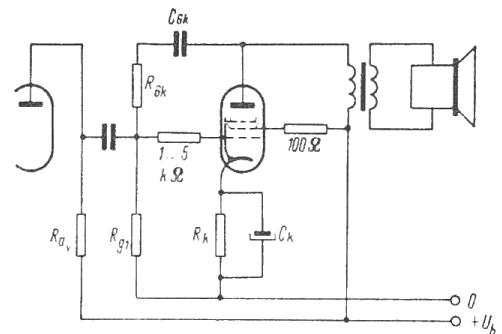


Bild 42. Spannungsgegenkopplung über die Endstufe

nis des Widerstandsnetzwerkes zwischen Anode und Gitter der gegengekoppelten Röhre berechnen. Bild 42 zeigt eine gegengekoppelte Endstufe.  $C_{GK}$  soll einen möglichst kleinen kapazitiven Blindwiderstand gegenüber dem Gegenkopplungswiderstand  $R_{GK}$  aufweisen (also großer Kondensator).

Da durch die GK der Eingangsspannungsbedarf der Röhre erhöht wird, muß die Vorröhre eine höhere Ausgangsspannung abgeben können. Das ist natürlich nur in gewissen Grenzen verzerrungsfrei möglich. Deshalb bezieht man gern die Vorstufe in die GK mit ein und koppelt von der Anode der Endstufe auf die Katode der Vorstufe zurück. Bild 43 zeigt die Schaltung. Die Berechnung erfolgt hier zweckmäßigerweise nach

$$\frac{v}{v'} = 1 + v_2 \cdot \frac{R_{kv}}{R_{kv} + R_{GK}} \left( 1 + \frac{1}{v_2} \cdot \frac{R_{Gk}}{R_{av}} \right)$$

$v_2$  ist die Verstärkung der Endstufe, über die anderen Symbole gibt Bild 43 Auskunft.

In beiden Schaltungen kann man C – da es die Funktion nicht beeinflußt – fortlassen, wenn man dadurch die Gleichspannungsverhältnisse der Vorstufe nicht unzulässig ändert.

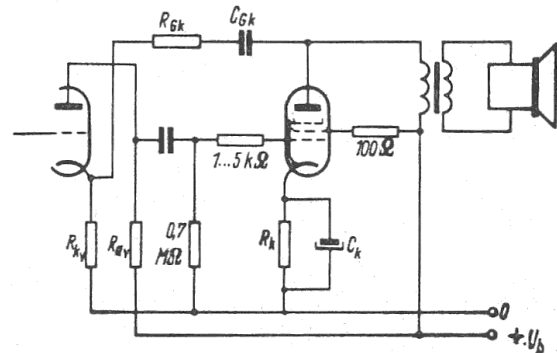


Bild 43. Gegenkopplung über End- und Vorstufe

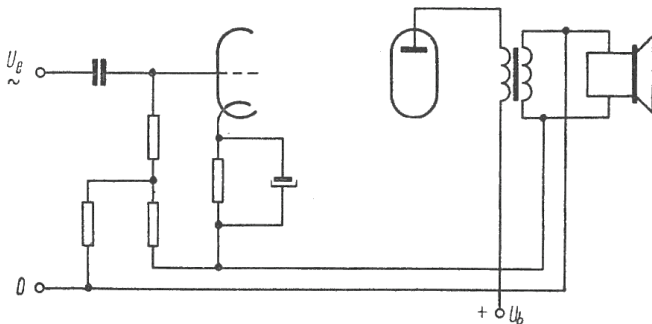


Bild 44. Gegenkopplung von der Sekundärseite des Ausgangsübertragers

Für die Gegenkopplung von der Sekundärseite des Ausgangsübertragers aus auf das Gitter der Vorstufe (Bild 44) geht man zweckmäßigerweise von der Grundgleichung auf S. 53 aus, setzt jedoch für  $v$  die mit dem Übersetzungsverhältnis des Ausgangsübertragers multiplizierte Gesamtverstärkung und für  $\alpha$  wieder das Spannungsteilerverhältnis des Gegenkopplungsnetzwerkes ein.

Erwähnt sei außerdem, daß man durch die Verwendung von geeignet in das Gegenkopplungsnetzwerk geschalteten Kapazitäten den Frequenzgang des Verstärkers beeinflussen kann: In den Bildern 42 und 43 bewirkt  $C_{GK}$  – falls zu klein bemessen – eine Baßanhebung, weil durch das Ansteigen seines kapazitiven Widerstandes die Gegenkopplung für tiefe Frequenzen geringer wird. Macht man  $C_{GK}$  noch kleiner, so kann der Verstärker sogar als Generator wirken, d. h., er schwingt.

Die Schwingneigung ist übrigens auch der Grund, warum Gegenkopplungen über drei Stufen nur bei sehr sorgfältiger Dimensionierung und über vier Stufen nicht mehr gelingen. Der Amateur mit meist geringen Meßmöglichkeiten tut gut daran, nur jeweils über zwei Stufen gegenzukoppeln.

Bei Eigenentwurf von Gegenkopplungsschaltungen ist zu berücksichtigen, daß die Gegenkopplungsspannung stets eine Verkleinerung der Nutzspannung bewirken soll. Dies ist durch eine kurze Kontrolle auf richtige Phaselage der Spannungen zu überprüfen.

#### 4.5 Die Ultralinear-schaltung

Die sogenannte Ultralinear-schaltung ist eine Schirmgitterspannungsgegenkopplung, die sich bei jeder Endpentode anwenden läßt. Hier wird – ausnahmsweise – auch die Ausgangsleistung durch die Gegenkopplung reduziert. Die Schaltung zeigt Bild 45. Das Schirmgitter ist nicht, wie allgemein üblich, an  $U_B$ , sondern an eine Anzapfung auf der Primärseite des Ausgangsübertragers

geführt. Dadurch steuert das Schirmgitter „dem Gitter entgegen“. Wir können uns die Wirkungsweise der Ultralinear-schaltung sehr einfach erklären:

Läge das Schirmgitter an der vollen Wicklung des Übertragers, so würde die Röhre als Triode arbeiten, denn Anode und Schirmgitter wären verbunden. Im anderen Extremfall läge das Schirmgitter an +  $U_b$ , die Röhre würde als „reine“ Pentode wirken. Bei Anschluß des Schirmgitters an eine Anzapfung der Trafowicklung arbeitet die Röhre als ein Zwischending zwischen Triode und Pentode. Im einzelnen tritt dabei folgendes auf:

- a) Der Innenwiderstand der Röhre ist kleiner als in „klassischer“ Pentodenschaltung.
- b) Die Ausgangsleistung ist geringer als in Pentodenschaltung.
- c) Die Verzerrungen sind bei Vollaussteuerung kleiner als in Pentodenschaltung.

Um einen sinnvollen Kompromiß zwischen Verringerung der Ausgangsleistung und Verringerung des Innenwiderstandes zu treffen, schließt man das Schirmgitter ungefähr bei 1/5 bis 1/3 der Gesamtwindungszahl der Primärwicklung an.

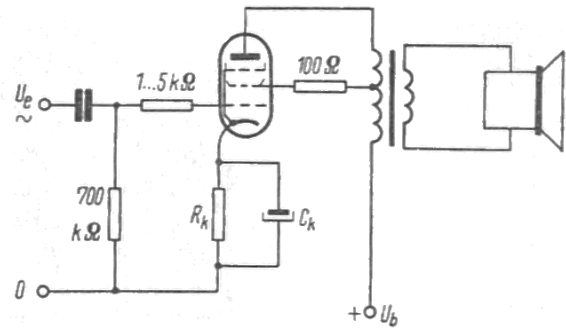


Bild 45. Endstufe in Ultralinear-schaltung

#### 4.6 Spezialschaltungen der Endstufe

Es gibt einige Spezialschaltungen für die Endstufe, die gelegentlich auftauchen. Obwohl sie meist einige bemerkenswerte Vorteile gegenüber den konventionellen Schaltungen aufweisen, konnten sie sich bis jetzt nicht generell durchsetzen.

Die „eisenlose“ Endstufe leitet ihren Namen aus der Besonderheit ab, daß sie ohne Ausgangsübertrager arbeitet und demzufolge auch keine Verzerrungen durch den Übertragerkern aufweist.

Zu diesem Zweck mußte der Anpaßwiderstand möglichst klein sein, da sich Schwingspulen mit 4 bis 8 k $\Omega$ , wie sie der  $R_a$  der meisten Endröhren verlangt, nur schwer realisieren lassen. Außerdem ist die übliche Gegentaktschaltung unbrauchbar, denn es ist schwierig, die Schwingspule mit einer Mittelanzapfung auszuführen.

In Bild 46 sehen wir die ausgeführte Schaltung einer eisenlosen Endstufe mit zwei für diesen Zweck speziell entwickelten Röhren EL 86. Mit ihr erreicht man etwa 5 W Ausgangsleistung bei 10 Prozent Klirrfaktor, also wenig für den beträchtlichen Aufwand. Durch Ersatz des Widerstandes  $R_1$  durch eine NF-Drossel und getrennte Einspeisung der Schirmgitterspannung für  $R_{ö2}$  (150 V), lassen sich etwa 9 W bei leicht geänderter Anpassung ( $R_a = 800 \Omega$ ) erreichen.

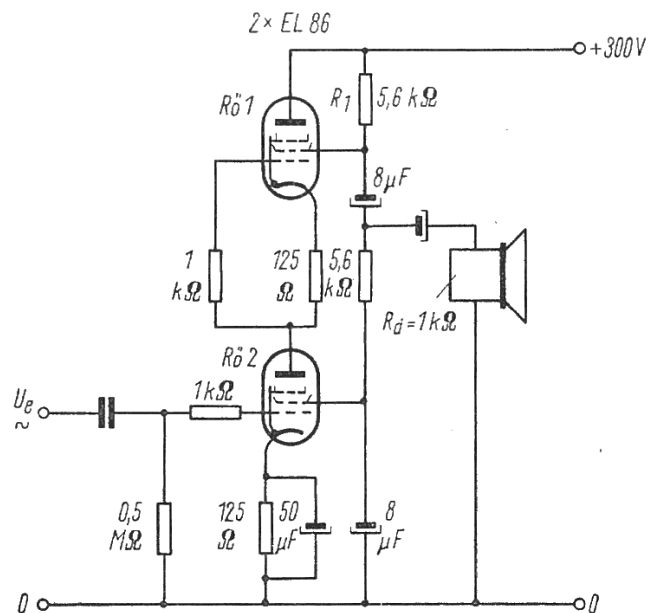


Bild 46. Eisenlose Endstufe mit 2 x EL86

.....  
 Weitere Verstärkerschaltungen sind in den Bildern 49 und 50 angegeben.

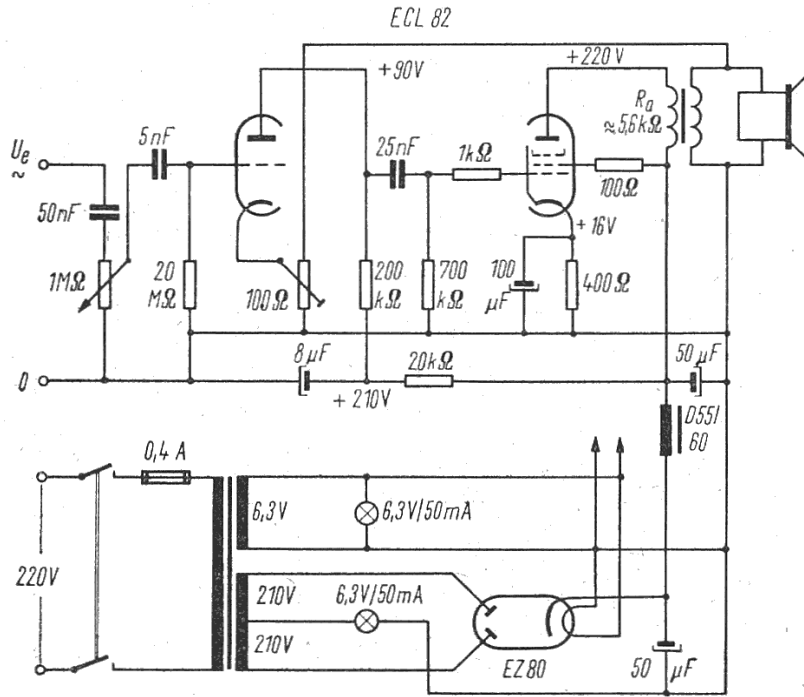


Bild 49. Kleiner Endverstärker mit Vorstufe,  $N_a$  etwa 3 W,  $U_e$  mindestens 130 mV

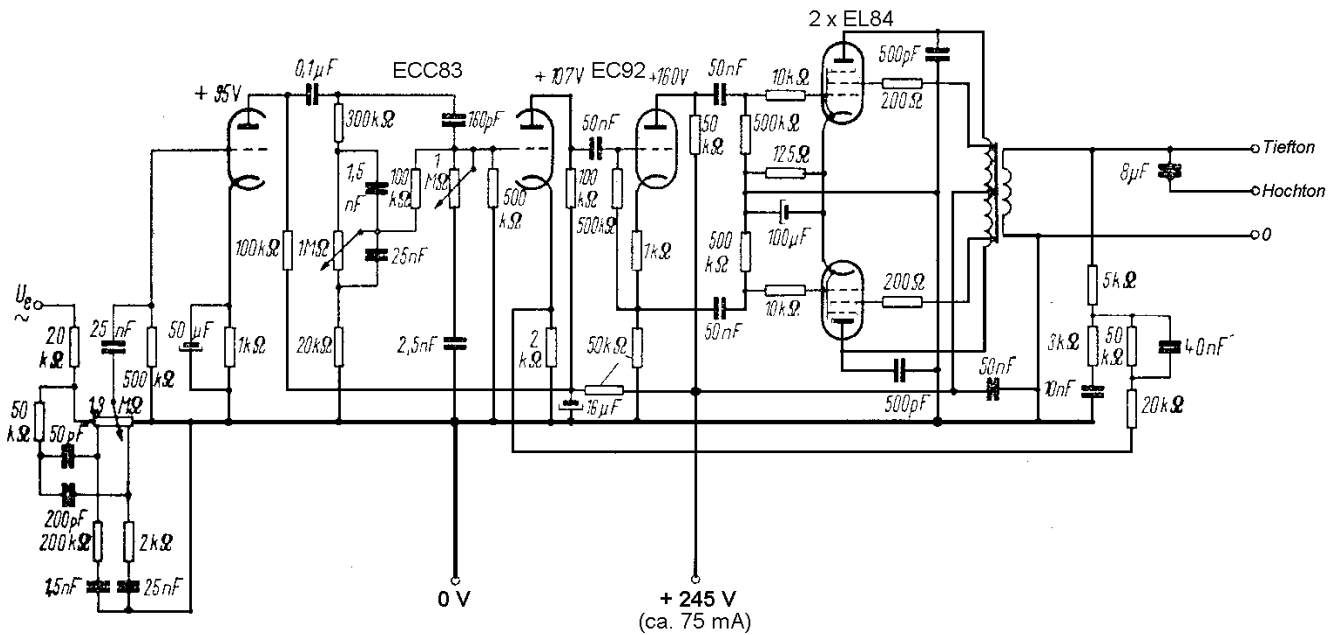


Bild 50. Hochwertiger Verstärker für  $N_a$  etwa 8 bis 10 W vom VEB Elektroakustik