

# Faszination Röhre Teil 7 High-End-HiFi-Stereo- Röhrenverstärker ELV-RV-100

*Nachdem wir die Röhren, ihre Eigenschaften und Einsatzfälle ausführlich kennengelernt haben, ist es nun an der Zeit, den wohl beliebtesten Einsatzfall - eine Röhrenendstufe in HiFi-, ja sogar High-End-Qualität kennenzulernen. Wir diskutieren Varianten, widmen uns dem Problem Ausgangsübertrager, wählen die Röhren aus und beschreiben die Schaltungstechnik des High-End-HiFi-Stereo-Röhrenverstärkers ELV-RV-100.*

## Die Röhrenendstufe - A, AB, B oder D?

Bei der Konzeption einer NF-Endstufe sind zahlreiche Fragen zu beantworten, um die günstigste Variante für den vorgesehenen Einsatzfall zu finden:

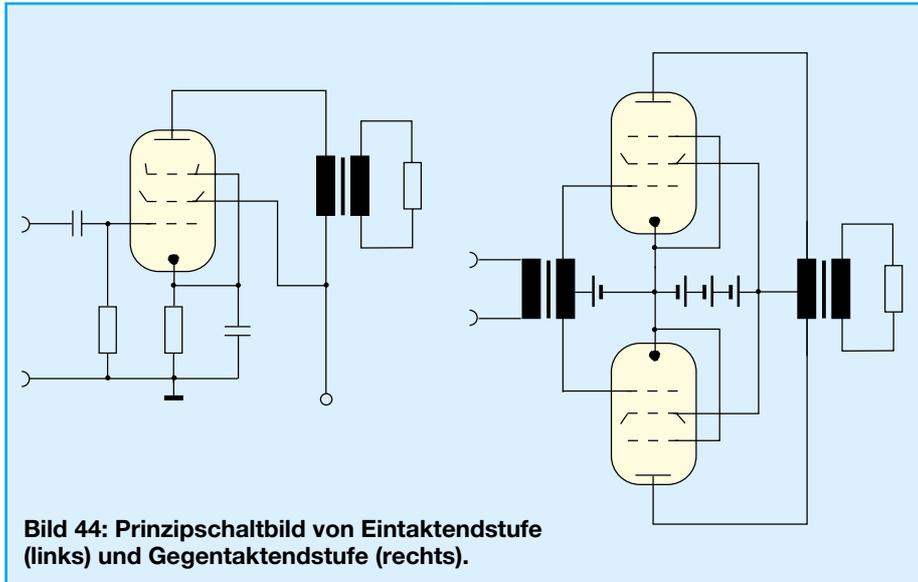
Triode oder Pentode, Eintakt- oder Gegentaktschaltung, welche Lautsprecher sollen betrieben werden (wodurch die erforderliche Ausgangsleistung entscheidend mitbestimmt wird), wie hoch sind die Anforderungen an die verwendeten Bauteile wie Röhren, Kondensatoren und Übertrager zu schrauben, um einen guten Kompro-

miß zwischen Preis und erreichbaren Parametern zu schließen, und, und, und...

Wir wollen kurz die angesprochenen Probleme anhand der praktischen Anfor-

**Tabelle 6: Schaltungsvarianten der EL 34 in Audioendstufen (nach Unterlagen von Siemens)**

	Triode		Pentode		
	Eintakt A	Gegentakt AB	Eintakt A	Gegentakt AB	Gegentakt B
$U_a$ (V)	375	400	265	375	800
$I_a$ (mA)	70	2x65	100	2x75	2x25
$U_{g1}$ (V)	-27	-23,4	-13,5	-22	-39
$R_a, R_{aa}$ (k $\Omega$ )	3	5	2	3,4	11
$U_{g1-}$ (V)	18,9	22	8,7	21	23,4
$K$ (%)	8	3	10	5	5
$P_{a-}$ (W)	6	16,5	11	35	100



**Bild 44: Prinzipschaltbild von Eintaktendstufe (links) und Gegentaktendstufe (rechts).**

derungen diskutieren, ohne dabei nochmals allzusehr die Mathematik und die Theorie zu bemühen.

Betrachten wir zunächst die Grundsaltung für den Eintakt- und Gegentaktbetrieb von Endstufen. Beide Varianten sind in Abbildung 44 dargestellt.

Bei der Eintaktschaltung liegt der Arbeitspunkt im geraden Teil der  $I_a-U_g$ -Kennlinie und ist so eingestellt, daß er unterhalb der Verlustleistungshyperbel liegt. Die Aussteuerung erfolgt symmetrisch um diesen Punkt mit der positiven und negativen Halbwelle der Steuerspannung. Diese Betriebsart heißt „A-Betrieb“ und ist für Audioanwendungen der einzig sinnvolle (bei der Eintaktschaltung).

Bei der Gegentaktschaltung übernimmt jede Röhre eine Halbwelle bei der Aussteuerung. Aus diesem Grunde kann man den Arbeitspunkt aus dem „A-Betrieb“ in den sogenannten AB-, B- oder D-Betrieb verlagern, d. h., die Gleichspannung  $U_{g1}$

soweit vergrößern, daß der Arbeitspunkt aus dem geraden Teil der  $I_a-U_g$ -Kennlinie zu immer kleineren  $I_a$ -Werten hinwandert. Die entnehmbare Ausgangsleistung wächst dabei an. Je weiter man sich jedoch mit dem Arbeitspunkt zu kleineren  $I_a$ -Werten hinbewegt, desto größer werden auch die Verzerrungen, da die resultierende Kennlinie immer weiter von einer Geraden abweicht.

Somit hat man bei der Gegentaktendstufe einen recht großen Spielraum hinsichtlich der Abwägung zwischen entnehmbarer Ausgangsleistung und zulässigem Klirrfaktor.

Für hohe Anforderungen an die Übertragungsgüte wird man mindestens den AB-Betrieb wählen, bei gewissem Verzicht auf Ausgangsleistung sogar den A-Betrieb vorziehen.

Die Tabelle 6 zeigt die mit der EL 34 in verschiedenen Schaltungen erzielbare Ausgangsleistung. Man erkennt, daß die kleinste Ausgangsleistung mit der Triodenschal-

tung im Eintakt-A-Betrieb und die größte mit Pentodenschaltung im Gegentakt-B-Betrieb erreicht wird. Die Werte der Tabelle sind nicht auf den gleichen Klirrfaktor bezogen, zeigen aber deutlich die Tendenz, außerdem sind bei diesen Werten keine klirrfaktorreduzierenden Maßnahmen wie Gegenkopplungen usw. berücksichtigt.

Wir erinnern uns an die typischen, sehr unterschiedlichen Kennlinienverläufe von Trioden und Pentoden („ELVjournal“ 2/97, S. 24). Daraus resultiert, daß diese Röhrentypen beim Einsatz im Leistungsverstärker auch hinsichtlich Klangeigenschaften und Klirrfaktor sehr unterschiedliches Verhalten zeigen.

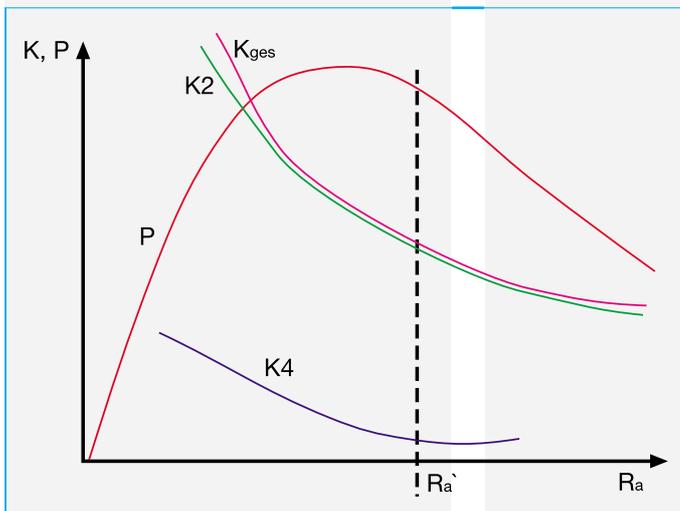
Die Abbildungen 45 und 46 dokumentieren das typische Verhalten von Trioden und Pentoden in Leistungsverstärkern.

Die Triode (Abbildung 45) erzeugt nur geradzahlige Harmonische  $K_2, K_4$  usw., die den Gesamtklirrfaktor ergeben. Er nimmt mit wachsendem Außenwiderstand ebenso ab wie die erzielbare Ausgangsleistung. Der optimale Außenwiderstand  $R_a'$  wird so gewählt, daß ein Kompromiß aus beiden Größen erreicht wird. Er liegt etwa bei  $R_a' \approx 3R_i$ .

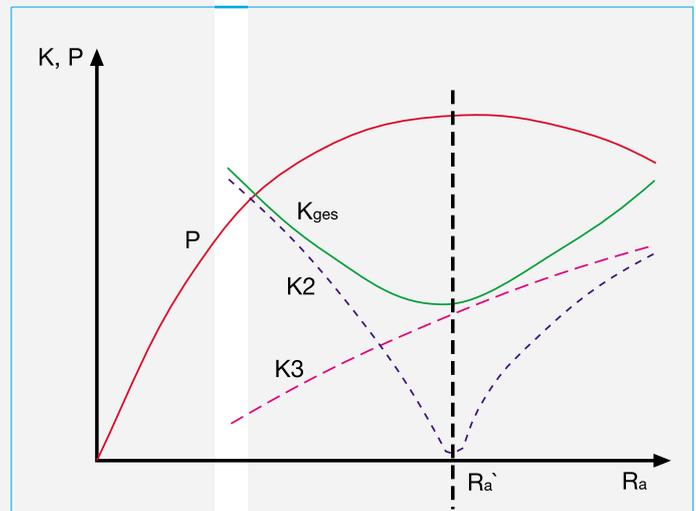
Bei Gegentaktbetrieb zeigt sich, daß sich wegen der auftretenden Phasenlage die geradzahligen Harmonischen zum großen Teil auslöschen, so daß insgesamt ein geringerer Klirrfaktor erreicht wird.

Wegen des geringen Innenwiderstands der Trioden werden die Wirkungen der komplexen Last (Lautsprecher mit Ausgangsübertrager) gut bedämpft.

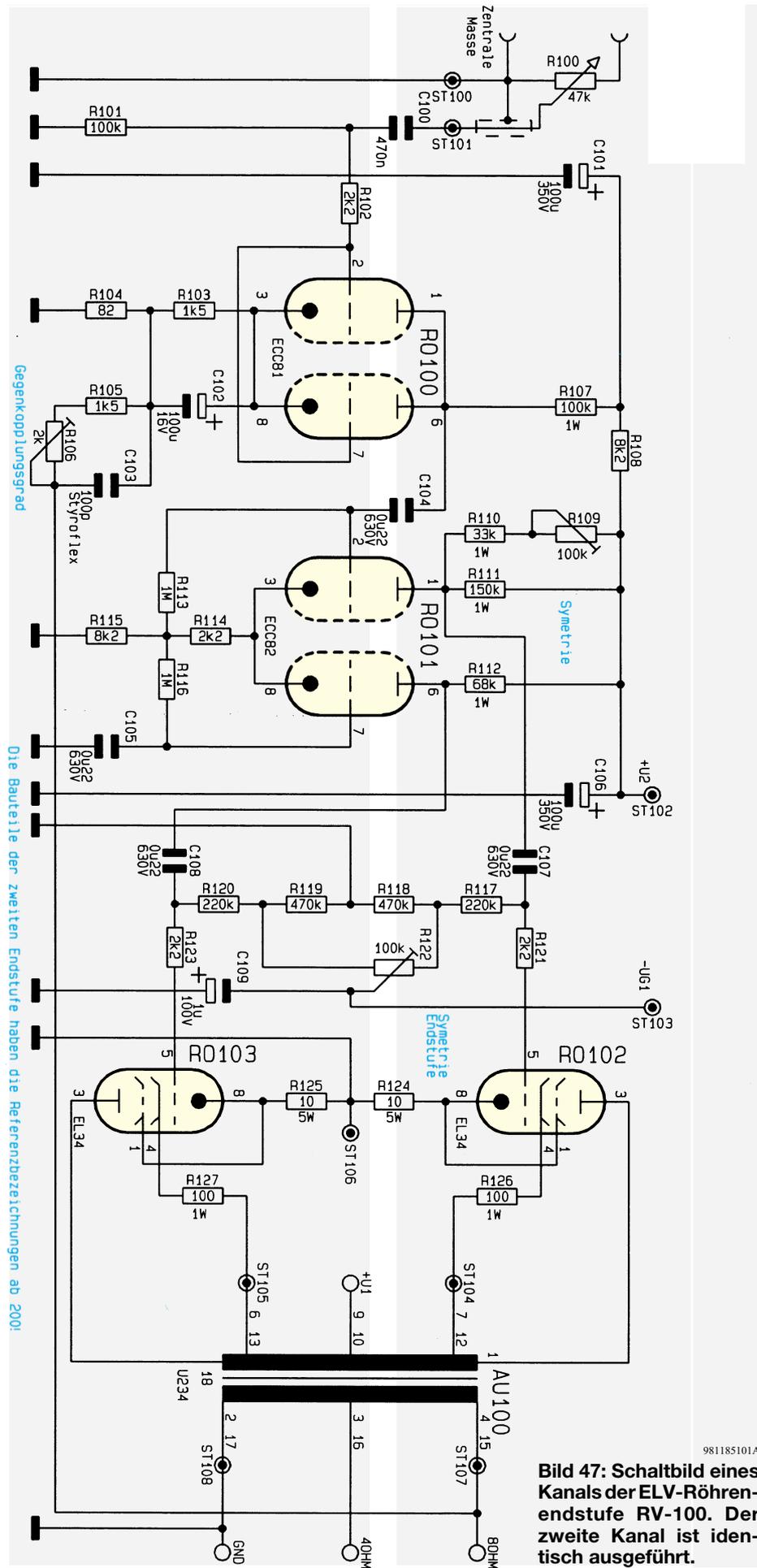
Anders verhält sich dagegen die Pentode (Abbildung 46). Es ist ein deutliches Minimum des Gesamtklirrfaktors bei einem bestimmten Außenwiderstand  $R_a$  erkennbar. Dies resultiert aus einem Minimum der Harmonischen  $K_2$ . Daneben tritt



**Bild 45: Typischer Verlauf von Klirrfaktor K und Ausgangsleistung P einer Triodenendstufe als Funktion vom Außenwiderstand  $R_a$ .**



**Bild 46: Typischer Verlauf von Klirrfaktor K und Ausgangsleistung P einer Pentodenendstufe als Funktion des Außenwiderstandes  $R_a$ .**



**Bild 47: Schaltbild eines Kanals der ELV-Röhrendstufe RV-100. Der zweite Kanal ist identisch ausgeführt.**

jedoch mit wachsendem  $R_a$  steigend die Harmonische K3 auf.

Diese Harmonische ist für den charakteristischen, etwas unangenehm wirkenden Pentodenklang verantwortlich. Da sich bei der Gegentaktschaltung im Gegensatz zur (ohnehin geringen K2-Harmonischen) die Harmonische K3 nicht auslöscht, sondern addiert, wird der „Pentodeneffekt“ sogar noch etwas verstärkt. Durch den sehr großen Innenwiderstand der Pentode wird die Bedämpfung der komplexen Last geringer als bei Trioden.

Der Wert für  $R_a$  beträgt größenordnungsmäßig

$$R_a \approx \frac{U_a}{I_a}$$

### Also muß die Triode her...oder?...

Leider ist es doch nicht so einfach, denn es gibt noch mehr zu bedenken, wenn wir Tabelle 6 näher betrachten.

Wir wissen, daß durch das Schirmgitter der Pentode die Wirkung der Anode auf die Steuerspannung ( $G_1$ ) stark vermindert wird. Das heißt, wir brauchen bei der Pentode eine wesentlich geringere Ansteuerspannung. Das spart Vorstufen bzw. diese lassen sich für eine geringere Aussteuerung auslegen.

Weiterhin ist der Wirkungsgrad von Pentoden wesentlich besser. Für eine gleich große Wechselspannungs-Ausgangsleistung ist die aufzubringende Gleichstromruheleistung einer Pentodenstufe wesentlich geringer als bei der entsprechenden Triodenendstufe.

Was ist nun zu tun?

Wir denken nochmals zurück: Verbindet man  $G_2$  der Pentode mit der Anode, so entsteht eine Triode. Legt man nun das  $G_2$  einer Pentodenendstufe an eine Anzapfung der Primärwicklung des Ausgangstrafos, erhält man eine Arbeitsweise, die in allen bisher diskutierten Punkten einen Kompromiß darstellt. Sie verbindet teilweise die jeweils günstigen Eigenschaften von Trioden- und Pentodenendstufen.

Diese Schaltung bezeichnet man als Ultralinear-schaltung. Sie wurde viele Jahre in hochwertigen Audioanlagen eingesetzt und stellt für viele Anwendungsfälle trotz des Kompromisses ein Optimum dar.

Die reine Triodenendstufe im A-Betrieb bleibt sicher Liebhabern vorbehalten, da wegen des schlechten Wirkungsgrades aufwendige Leistungsnetzteile, eine hohe Ansteuerspannung und der Einsatz sehr teurer, spezieller Trioden erforderlich sind. Oder aber es sind bei Beschränkung auf kleine Ausgangsleistungen (<20 W) spezielle Lautsprechersysteme mit hohem Wirkungsgrad Bedingung.

Damit entscheiden wir uns für die Aus-

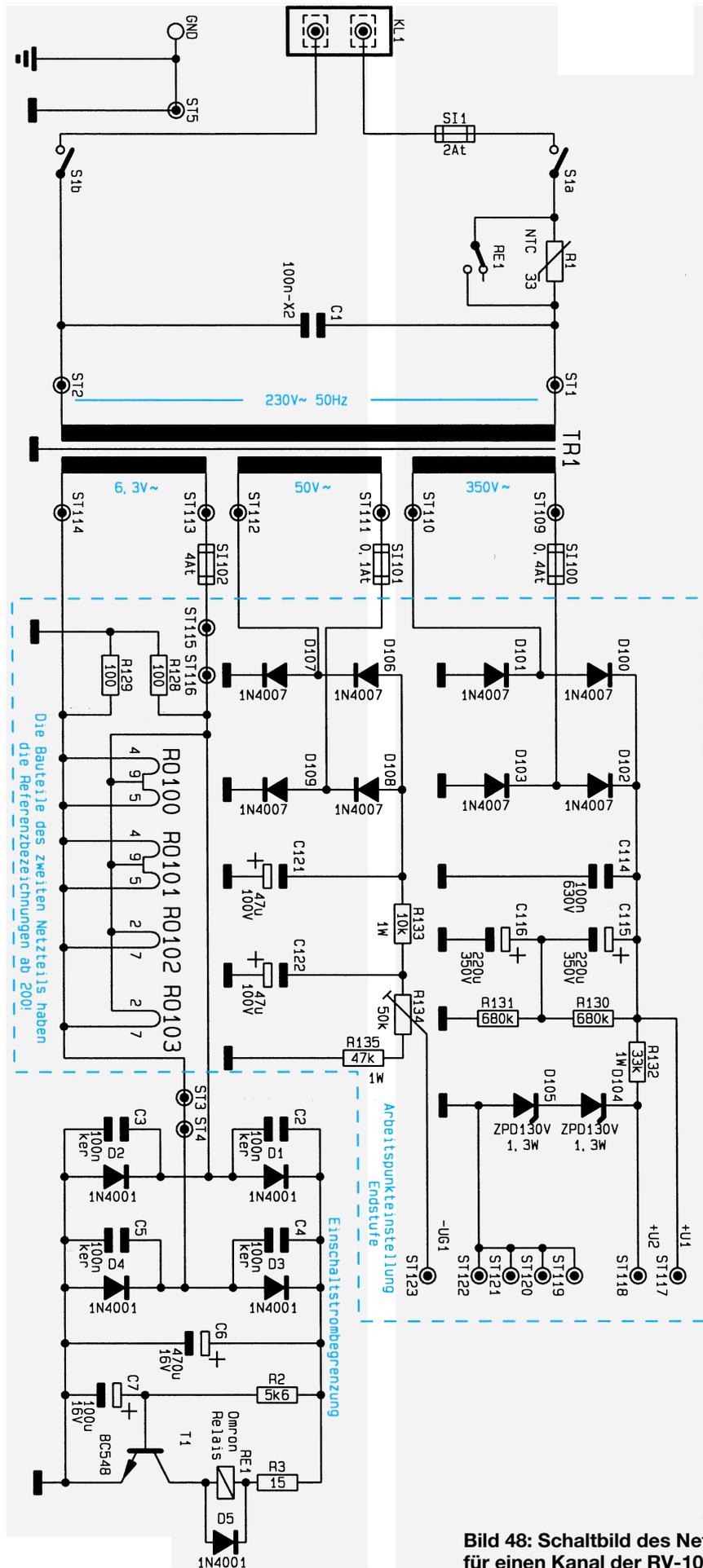


Bild 48: Schaltbild des Netzteils für einen Kanal der RV-100.

führung unserer Endstufe als Gegentakt-Ultralinear-schaltung und wollen uns nun einem wichtigen Punkt widmen: Der Auswahl geeigneter Bauteile.

Wer die nachfolgend beschriebene Schaltung nachbauen möchte, muß unbedingt Wert auf die Auswahl geeigneter Bauteile legen, um zum einen sowohl die Sicherheitsvorschriften beim Umgang mit den auftretenden lebensgefährlichen Spannungen einhalten zu können als auch zum anderen die angestrebten Daten der Endstufe zu erreichen. Daß nur Profis Aufbau und Inbetriebnahme durchführen dürfen, die aufgrund ihrer Ausbildung dazu befugt sind, versteht sich bei einem derart anspruchsvollen Projekt von selbst und sei nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Aufgrund der Komplexität und der zahlreichen Besonderheiten des ELV-RV-100 wollen wir nachfolgend noch einige grundsätzliche Hinweise für den Selbstbauer geben, die insbesondere auch in bezug auf die Qualität der verwendeten Komponenten in den ELV-Bausätzen und Fertigeräten selbstverständlich berücksichtigt sind.

### Herzstück Ausgangsübertrager

Der Ausgangsübertrager hat den Lastwiderstand (den komplexen Widerstand der Lautsprecherkombination) verzerrungsfrei in den optimalen Außenwiderstand der Endstufe zu transformieren, und zwar über einen weiten Frequenzbereich von mindestens 20 Hz bis 20 kHz in einem Leistungsbereich bis mindestens 50 W (auf den ELV-RV-100 bezogen).

Diesen Anforderungen kann man nur mit hohem Aufwand nachkommen. Sowohl die Materialien (insbesondere das verwendete Eisen) als auch die Ausführung (verschachtelte Wicklungen und die Wickeltechnik) sowie die Fertigungstechnik selbst müssen neben der Berechnung der Daten sorgfältig aufeinander abgestimmt sein. Berechnet man einen Ausgangsübertrager nach den in der Literatur in unterschiedlichen Varianten angegebenen Methoden und läßt in einer Trafowickelkelei danach den Ausgangstrafo wickeln, wird man vom Ergebnis fast immer enttäuscht, wenn nicht gar niedergeschmettert sein.

Darum sollte man am Ausgangsübertrager nicht sparen, sondern ein Fabrikat einer renommierten Firma verwenden. Diese Firmen haben ihre High-End-Produkte in jahrelanger Arbeit optimiert und garantieren damit Freude an den Meßwerten und vor allem Hörgenuß.

### Welche Röhren?

Bei der Röhrenausswahl braucht in der

vorgestellten Schaltungsvariante kein „Kult“ betrieben zu werden, jedoch sollte man ausschließlich auf Markenfabrikate zurückgreifen und mindestens für die Endstufen die Röhren paarweise ausmessen. Das heißt in der Praxis: Röhren mit möglichst gleichem Anodenstrom bei gleicher  $U_{g1}$ -Spannung im Arbeitspunkt auswählen. Seit Teil 2 unserer Serie („ELVjournal“ 2/97) wissen wir ja, wie man Röhrenkennlinien aufnimmt, und die Praktiker unter Ihnen haben vielleicht das damals verwendete Equipment noch in Reichweite gelassen.

Röhren mit unstabilem Systemaufbau oder Röhren mit Neigung zu verstärktem  $G_1$ -Strom sind grundsätzlich nicht zu verwenden.

## Kondensatoren

Auch wenn absolute Hörspezialisten aus dem Klang eines Röhrenverstärkers auf den Typ der eingesetzten Kondensatoren schließen können, werden wir in unserer Schaltung zwar gute Kondensatoren, aber keine (super-teuren) Exoten einsetzen. Die Koppelkondensatoren sollten verlust- und induktionsarm sein und eine hohe Isolationsfestigkeit aufweisen. MKT- und MKD-Kondensatoren erfüllen diese Aufgabe. Für die Elektrolytkondensatoren sollte man sogenannte Audio-Typen einsetzen, die geeignet sind, die Tonfrequenz-Ströme zu verarbeiten.

## Die ELV-Röhrendstufe

Wie bereits gesagt, haben wir uns für eine Gegentaktendstufe in Ultralinear-schaltung entschieden, deren Schaltung in Abbildung 47 zu sehen ist.

Die Schirmgitter der Endpentoden des Typs EL 34 liegen an einer Anzapfung des Ausgangsübertragers AU 100. Zur Arbeitspunkteinstellung der Endröhren dient eine im Netzteil erzeugte, mit R 134 einstellbare negative Gleichspannung. Es werden Ruhestrome von ca. 60 mA empfohlen, je nachdem, ob man persönlich mehr in Richtung AB- oder A-Betrieb tendiert. In jedem Falle gewährleistet der höhere Ruhestromwert einen geringeren Klirrfaktor.

Indem man die Katodenspannungen an R 124 und R 125 mittels R 122 auf gleiche Werte gegen Masse (ohne Aussteuerung) einstellt, wird die Symmetrie der Endröhren hergestellt.

Die gegenphasige Ansteuerung der Endröhren erfolgt durch die Röhre RÖ 101 (ECC 82). Das Gitter des Systems II liegt über C 105 wechselstrommäßig auf Mas-

se, so daß die Steuerung dieses Systems über den gemeinsamen Katodenwiderstand R 114/115 beider Systeme erfolgt.

Die Gittervorspannung zur Arbeitspunkteinstellung der Stufe wird als Spannungsabfall über R 114 gewonnen. Mit R 109 wird die Stufe auf Symmetrie abgeglichen. Es läßt sich dabei ein eindeutiges Klirrfaktorminimum erreichen.

Als Vorstufe dient RÖ 100, eine ECC 81, deren Systeme parallel geschaltet sind. Die Gittervorspannung wird als Spannungsabfall über dem Katodenwiderstand R 103/ R 104 gewonnen.

Vom Ausgangsübertrager erfolgt eine Gegenkopplung über R 105. Der Gegenkopplungsgrad wird mit R 106 eingestellt, womit auch der Feinabgleich der Empfindlichkeit beider Kanäle vorgenommen werden kann, so daß für beide Kanäle bei exakt 0 dB Eingangsspannung Vollaussteuerung erreicht wird.

Das Potentiometer R 100 dient als Pe-

## Hervorragende Kanaltrennung durch getrennten Endstufen- und Netzteilbau für beide Endstufen des HiFi-Stereo-Röhrenverstärkers ELV-RV-100.

gelanpaßregler an verschiedene Quellen (z. B. Vorverstärker).

Auf eine Klangbeeinflussung wurde bewußt verzichtet, die Schaltung gewährleistet so einen absolut „geraden“ Frequenzgang von weniger als 20 Hz bis über 20 kHz bei voller Sinusausgangsdauerleistung von > 50 W je Kanal.

## Das Netzteil

Die Schaltung des Netzteils ist in Abbildung 48 dargestellt. Es ist mit einem beträchtlichen Aufwand realisiert, um den Anforderungen zu genügen, die die hochwertige Endstufe an ihre Stromversorgung stellt. Allerdings, dies mögen Puristen verzeihen, wurde auf Gleichrichtung mittels Röhrendioden und stabilisierte Gleichstromheizung verzichtet, da diese Faktoren in Endstufen nicht so entscheidend sind wie z. B. in Röhrenvorverstärkern und Phono-Entzerrerverstärkern.

Für jeden Endstufenkanal ist konsequenterweise ein separates Netzteil vorgesehen, um die hohe Kanaltrennung von mehr als 100 dB zu erreichen. Lediglich der Netztransformator, bei dem es sich um einen besonders „steifen“ Ringkerntransformator handelt, ist zur Versorgung beider Endstufen ausgelegt.

Dieser Ringkerntransformator liefert alle benötigten Wechselspannungen: Die Heizspannung (6,3 V), die Spannung zur Gitter-

vorspannungserzeugung (50 V) sowie die Spannung zur Erzeugung der Anodenspannung (350 V).

Die Gleichrichtung erfolgt in Brückenschaltung mit Si-Gleichrichterdiode.

Zwei in Reihe geschaltete Elkos von je 220 µF/350 V sorgen für die Siebung der Anodenspannung. Die Reihenschaltung von zwei Elkos ist notwendig, da bis zur Erreichung der Betriebstemperatur der Endröhren Gleichspannungen über 500 V am Siebelko auftreten können. Die Spannungsverteilung über den Elkos wird durch R 130/131 ausgeglichen.

Die Anodenspannung der Phasenumkehrstufe und der Vorstufe wird durch zwei Z-Dioden auf 260 V stabilisiert.

Die Gittervorspannung für die Endröhren gewinnt man ebenfalls durch Brückengleichrichtung (D 106 bis D 109). Die Rohspannung wird durch C 121/C 122 sowie R 133 sauber geglättet und steht einstellbar an R 134 zur Verfügung.

Die Heizung aller Röhren je Kanal erfolgt parallel. Dabei ist die Heizspannung, wie in der Röhrentechnik üblich,

über R 128/R 129 symmetriert.

Aus der Heizspannung wird über einen Brückengleichrichter (D 1 bis D 4) und den Elko C 6 eine Hilfsspannung gewonnen, die mit zeitlicher Verzögerung, hervorgerufen durch die RC-Kombination R 2/C 7, über T 1 ein Leistungsrelais schaltet. Der Arbeitskontakt dieses Relais schließt nach Ablauf der erwähnten Zeitverzögerung einen mit der Primärwicklung des Netztrafos in Reihe liegenden Heißeiter kurz.

Diese Schaltungsmaßnahme begrenzt den hohen Einschaltstromstoß, der durch die Verwendung eines Ringkernnetztrafos und wegen des sehr geringen Widerstands der Heizfäden im Einschaltmoment auftritt. So ist ein röhrenschonender Softstart möglich.

Diese Einschaltverzögerung ist nur einmal vorhanden und wirkt gleichzeitig auf beide Netzteile.

Demgegenüber sind die Netzteile, wie bereits erwähnt, zur Erzielung einer optimalen Kanaltrennung für jede Endstufe getrennt, wenn auch auf einer gemeinsamen Platine, aufgebaut.

Völlig getrennt, also auch auf separaten Platinen, sind aus gleichem Grunde die Endstufen für jeden Kanal ausgeführt.

Soweit die Schaltungsbeschreibung der ELV-Röhrendstufe RV 100. Im nächsten Teil unserer Reihe werden wir uns dem Aufbau der Endstufe widmen sowie über die erreichten technischen Daten und die Meßwerte berichten.

ELV