

High-End-Elektrostat-Kopfhörer-Verstärker EV 2000

Direkt ansteuernder 2000 Volt-Elektrostat-Kopfhörer-Verstärker



Es ist wohl unbestritten, daß Elektrostat-Kopfhörer die Krönung der Schallwandler darstellen. Eine Verbesserung läßt sich wie bei fast allen Dingen auch hier erreichen, und zwar in der Ansteuerung. Der im allgemeinen für Elektrostat-Kopfhörer erforderliche NF-Transformator kann beim Einsatz des hier vorgestellten 2000 Volt-High-End-Hochspannungsverstärkers ersatzlos entfallen, und die Ansteuerung erfolgt „eisenlos“ mit einer bis dahin kaum gekannten Brillanz. Beachten Sie bitte auch den Hochspannungshinweis am Schluß dieses Artikels.

Allgemeines

Zur Ansteuerung von elektrostatistischen Kopfhörern wird eine Wechselspannung bis zu 2000 V_{SS} benötigt. Bisher standen hierfür keine geeigneten Hochspannungsverstärker zur Verfügung, die hinsichtlich Dynamik, Bandbreite und Spannungsfestigkeit den Anforderungen gerecht wurden. Röhrenverstärker scheiden aufgrund ihres verhältnismäßig geringen Dynamikbereiches von 60 dB bis 65 dB von vornherein aus. So blieb bisher nur die Möglichkeit der Ansteuerung über einen NF-Transformator, der die von einer „normalen“ Endstufe kommenden Signale herauftransformiert. Hierbei ergeben sich jedoch selbst bei besonders hochwertigen NF-Transformatoren gewisse Signalverfälschungen, die bei geeigneter Auslegung zwar so gering bleiben können, daß auch in der Kombination Elektrostat-Kopfhörer/NF-Transformator gute Daten erreicht werden, die jedoch in erster Linie durch die Unzulänglichkeiten des Transformators eingeschränkt werden.

Bevor wir im weiteren Verlauf dieses Artikels auf den im ELV-Labor entwickelten High-End-Elektrostat-Kopfhörer-Verstärker EV 2000 eingehen, sollen zunächst die elektrostatistischen Kopfhörer selbst näher beleuchtet werden.

Der elektrostatistische Kopfhörer

Elektrostatistische Kopfhörer zeichnen sich durch eine besonders präzise Wiedergabe auch feinsten klanglicher Nuancen aus und nehmen deshalb eine Spitzenstellung unter den Kopfhörern ein. Sie besitzen eine im Vergleich zu dynamischen Kopfhörern besonders leichte und trägheitsarme Membran aus einer dünnen Kunststoffolie, die symmetrisch zwischen 2 schalldurchlässigen Genelektroden angeordnet ist. Die Membran wird entweder schwach leitfähig gemacht und mit einer Gleichspannung gegen beide Genelektroden vorgespannt, oder sie wird permanent durch Elektretisieren aufgeladen, wobei die Membran dann aus einem Kunststoff mit hierfür besonders ge-

eigneten Eigenschaften (Teflon) besteht. In beiden Fällen wird erreicht, daß die Membran eine konstante, homogen verteilte elektrische Ladung trägt.

Zwischen den Genelektroden wird durch Anlegen einer Wechselspannung (Audio-Signal) ein elektrisches Feld erzeugt. Dieses Feld wirkt auf die geladene Membran ein und erzeugt dort eine proportionale Kraft. Da die Ladung homogen über die Membran verteilt ist und das elektrische Feld zwischen den parallelen Genelektroden ebenfalls homogen ist, ist auch die Antriebskraft an jeder Stelle der Membran gleich groß. Das hat zur Folge, daß die Membran auch noch bei sehr hohen Frequenzen vollkommen einheitlich schwingt. Diese Eigenschaft führt in Kombination mit der geringen Membranmasse zu der hervorragenden Impulstreue der elektrostatistischen Kopfhörer.

Diesem unbestrittenen Vorzug steht als Nachteil gegenüber, daß elektrostatistische Kopfhörer wesentlich höhere Wechselspannungen zur Ansteuerung benötigen, als von üblichen Verstärkern abgegeben werden. Man benutzt deshalb Transformatoren zur Spannungsanpassung. Leider sind aber deren Eigenschaften keineswegs ideal. So besteht bei tiefen Frequenzen die Gefahr der magnetischen Sättigung des Eisens, und bei hohen Frequenzen entstehen Verluste durch Streuung. Deshalb ist ein Verstärker, der die hohe Spannung direkt liefern kann und damit die Transformatoren überflüssig macht, die bessere, um nicht zu sagen, die ideale Lösung. Da die Anschlußimpedanz elektrostatistischer Kopfhörer nahezu rein kapazitiv ist, muß der Verstärker fast nur Blindleistung aufbringen. Diese kann allerdings beachtliche Werte annehmen, wie die folgende Rechnung zeigt.

Die Kapazitäten elektrostatistischer Kopfhörer einschließlich Zuleitungen liegen bei etwa 150 pF, so daß die Impedanz bei 20 kHz etwa 50 k Ω beträgt. Der Spannungsbedarf für Vollaussteuerung liegt bei etwa 700V_{eff} entsprechend ca. 2000 V_{SS} (Sennheiser Unipolar 2000 und Unipolar 2002). Der Strom

bei 20 kHz und Vollaussteuerung beträgt also etwa 14 mA. Damit ergibt sich eine Blindleistung von etwa 10 W! Praktisch wird diese Leistung jedoch kaum jemals benötigt, da natürliche Signalspektren keine 20 kHz-Komponenten mit vollem Pegel enthalten. Die Blindleistung verringert sich mit abnehmender Frequenz und beträgt beispielsweise bei 1 kHz und Vollaussteuerung etwa 0,5 W und bei 100 Hz nur noch 50 mW. Werden 2 Kopfhörer parallel betrieben, dann verdoppelt sich die Kapazität und entsprechend auch die Blindleistung.

Realistisch betrachtet bietet ein Verstärkerkonzept mit den angegebenen Eckdaten 700 V und 14 mA (beides Effektivwerte) genügend praktische Reserven, um einen Kopfhörer bis 20 kHz bzw. 2 Kopfhörer bis 10 kHz voll aussteuern zu können. Bei halber Signalamplitude sind nach vorstehender Betrachtung auch 2 Kopfhörer mit 20 kHz ansteuerbar.

Damit die Verlustleistung der im A-Betrieb arbeitenden Endstufen des EV 2000 vertretbare Werte annimmt, wurde die Schaltung auf die vorstehend genannten Werte ausgelegt, d. h. daß beim Anschluß eines Kopfhörers der maximal mögliche Schalldruck auch bei 20 kHz erreicht werden kann. Dies ist jedoch mehr von akademischem denn von praktischem Interesse. Beim Anschluß von 2 Kopfhörern kann selbstverständlich auch die volle Bandbreite bis 20 kHz genutzt werden, wobei die maximal möglichen Signalamplituden bei 20 kHz um 3 dB eingeschränkt sind.

Damit an dieser Stelle keine Mißverständnisse entstehen, soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß dieses Verhalten keineswegs einen unlinearen Frequenzverlauf bedeutet, sondern lediglich die maximal mögliche Lautstärke im oberen Frequenzbereich um 3 dB reduziert. Wird diese wie bei üblichen Schallverteilungskurven nicht mehr benötigt, ist die Aussteuerbarkeit auch beim Anschluß von 2 Kopfhörern im vollen Umfang möglich.

Technische Daten: EV 2000

Eingänge:	Cinch und DIN sowie Lautsprecherbuchsen
Eingangsempfindlichkeit für Vollaussteuerung:	Cinch und DIN: 775 mV _{eff} Lautsprecher :12 V _{eff}
Ausgänge:	für Sennheiser Unipolar 2000 und Unipolar 2002
Ausgangsspannung:	max. ca. 700 V _{eff} \cong 2000 V _{ss}
Klirrfaktor (bei U _{max} -6 dB):	0,01 % bei 1 kHz 0,02 % bei 10 kHz
Frequenzgang:	20 Hz bis 20 kHz (\pm 0,4 dB)
Signal-Rauschabstand:	107 dB
Maße (B x H x T):	470 x 150 x 260 mm

Achtung: Aufgrund der hohen Ausgangsspannung des EV 2000 ist vor dem Anschluß eines Kopfhörers dieser auf einwandfreie Funktion, besonders der Isolation zu prüfen. Beim Anschluß von anderen Elektrostat-Kopfhörern als Sennheiser Unipolar 2000 bzw. Unipolar 2002 ist vorher festzustellen, ob die Betriebsspannungsfestigkeit bei min. 700 V_{eff} \cong 2000 V_{ss} liegt und der betreffende Hersteller eine Freigabe zum Anschluß an den EV 2000 erteilt hat.

Angegeben sind typ. Werte. - Technische Änderungen vorbehalten.

Zur Schaltung

Beginnen wir bei der Beschreibung des EV 2000 mit der Hochspannungserzeugung (Bild 1).

Ein großzügig dimensionierter 220 V/70 VA-Netztransformator (Tr 2) stellt an seiner Sekundärseite eine 350 V-Wechselspannung mit einer Belastbarkeit von 200 mA bereit. Diese wird in einer doppelten Einweg-Spitzenwert-Gleichrichtung in Verbindung mit den Pufferkondensatoren C 21 bis C 24 in eine Gleichspannung von ca. 1000 V umgesetzt. Die Widerstände R 58 bis R 69 dienen zur gleichmäßigen Spannungaufteilung auf die Pufferkondensatoren.

Die bei einer Belastung von nahezu konstant 40 mA auftretende Brummspannung liegt im Bereich von ca. 8 V entsprechend einer Restwelligkeit von weniger als 1 %. Für das hier vorliegende Verstärkerkonzept, das nach dem Stromquellenprinzip arbeitet, spielt diese Restwelligkeit keine Rolle. Ein

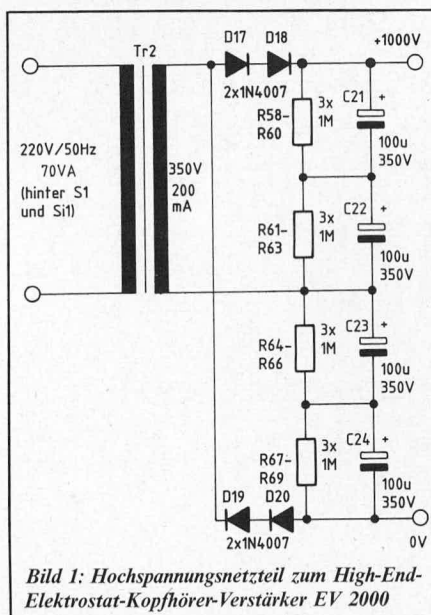


Bild 1: Hochspannungsnetzteil zum High-End-Elektrostat-Kopfhörer-Verstärker EV 2000

hierauf zurückzuführender Brummanteil am Verstärkerausgang ist im Bereich des vollen Dynamikumfangs nicht vorhanden. Auf eine zusätzliche elektronische Stabilisierung kann daher verzichtet werden.

Die Versorgung der Ansteuerverstärker sowie der übrigen Elektronik des EV 2000 erfolgt aus einem 24-V-Gleichspannungsnetzteil (Bild 2 oben links).

Über den 2poligen auf der Frontplatte angeordneten Netzschalter S 1 a, b sowie die Schmelzsicherung S 1 l gelangt die 220 V-Netzwechselspannung sowohl auf den 70 VA-Netztransformator Tr 2 als auch auf den zweiten separaten Netztrafo Tr 1. Die 24 V-Wechselspannung der Sekundärseite von Tr 1 wird über D 1 bis D 4 gleichgerichtet, durch C 1 gepuffert und mit Hilfe des Festspannungsreglers IC 1 auf 24 V stabilisiert. C 2 und C 3 dienen der Schwingneigungsunterdrückung. D 5 signalisiert die Betriebsbereitschaft, wobei der Vorwiderstand R 1 den Betriebsstrom für diese Leuchtdiode begrenzt.

Der eigentliche NF-Verstärkerteil ist in Abbildung 2 mit einer gestrichelten Linie umrahmt. Dieser Schaltteil ist doppelt vorhanden, im Schaltbild jedoch nur einmal gezeichnet, da er für die Endstufe des linken Kanals mit der Endstufe für den rechten Kanal absolut identisch ist. In der Durchnummerierung der einzelnen Bauteile ist als Unterscheidungsmerkmal ein „L“ für den linken Kanal bzw. ein „R“ für den rechten Kanal angefügt.

Zur Ansteuerung des EV 2000 können verschiedene Möglichkeiten genutzt werden:

1. Ansteuerung vom Lautsprecherausgang eines Vollverstärkers über dessen Endstufe. Die Ankopplung erfolgt über einen Lautsprecherstecker an der Lautsprecherbuchse des EV 2000. Das NF-Signal gelangt dann vom Platinenanschlußpunkt „s“ auf den Spannungsteiler R 70, 71. In seiner Amplitude um den Faktor

16 reduziert, gelangt dieses Signal auf den Wahlschalter S 2 auf der Gehäuserückseite.

2. Ansteuerung durch den Ausgang eines Vorverstärkers. Hierbei stehen 2 der gebräuchlichsten Anschlußbuchsen zur Verfügung:

- Cinch-Buchse für linken und rechten Kanal getrennt sowie
- DIN-Buchse, wobei hier eine Buchse zum Anschluß beider Kanäle dient.

Die entsprechenden Anschlußpins dieser Buchsen sind zusammengelegt und gemeinsam auf den zweiten Anschlußpunkt des Wahlschalters S 2 geführt.

Je nach Stellung von S 2 erfolgt die Ansteuerung entweder durch einen Vor- oder Vollverstärker (der Zusatz „a“ kennzeichnet diejenige Schalterhälfte, die den Signalweg für den linken Kanal umschaltet, während der Zusatz „b“ äquivalent die Schalterhälfte des rechten Kanals bezeichnet).

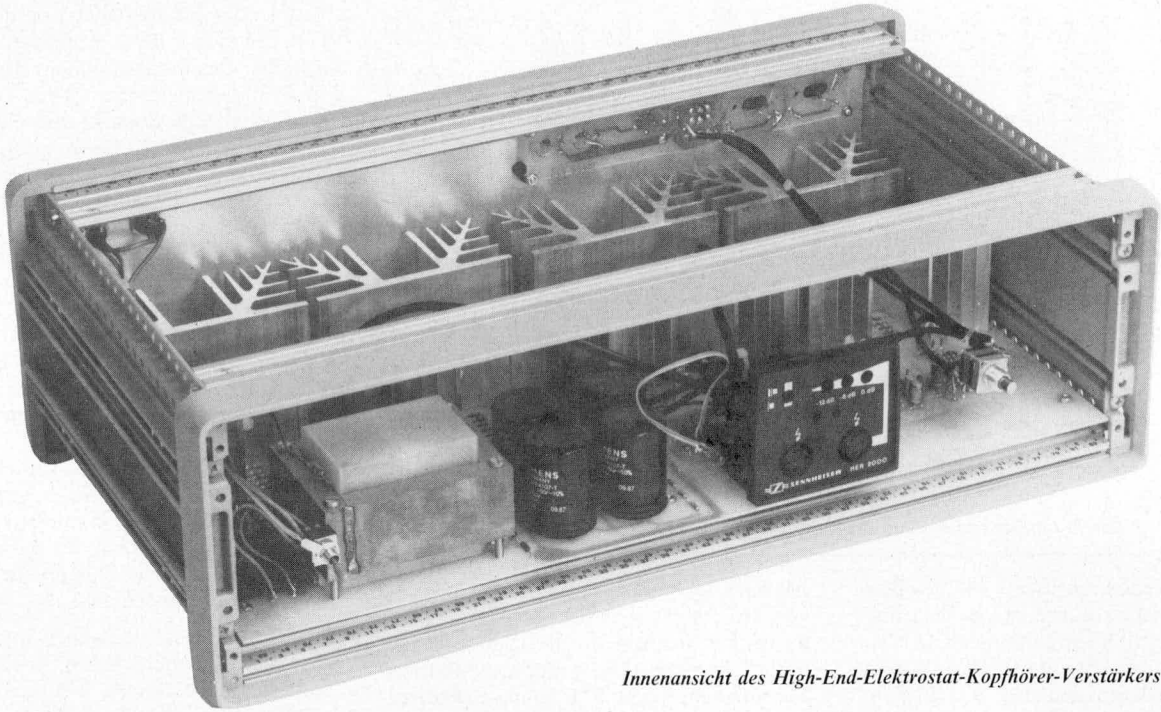
Das von S 2 über C 4 kommende NF-Eingangssignal gelangt auf das Stereo (Doppel-)Einstellpoti R 13, das zur Lautstärkeregelung dient. Vom Poti-Mittelabgriff wird das Signal über C 5 auf den nicht invertierenden (+) Eingang (Pin 3) des OP 1 geführt. Mit Hilfe des Spannungsteilers R 43, R 44 wird über R 42 der Gleichspannungs-Arbeitspunkt eingestellt (+ 12 V). Die Festlegung der Verstärkung dieser ersten Stufe erfolgt durch das Widerstandsverhältnis von R 14 und R 15 (hier 11fach).

Der Ausgang (Pin 1) des OP 1 arbeitet DC-gekoppelt über R 18 auf den invertierenden (-) Eingang (Pin 13) des nachfolgenden OP 2. Dieser steuert über R 24, C 10 das Gate des Hochspannungs-Power-MOS-FETs T 1 des Typs BUZ 50 B an. Hierbei handelt es sich um einen neuartigen, von der Firma Siemens entwickelten FET, dessen Besonderheit darin besteht, daß er auch bei Spannungen von 1000 V im Linearbetrieb definiert arbeiten kann. Diese Betriebsart ist allerdings nur bei verhältnismäßig geringen Strömen möglich, was im vorliegenden Fall den Anforderungen aber vollkommen entspricht.

Für die weitere Erläuterung der Funktionsweise wollen wir uns zunächst der Einfachheit halber den Widerstand R 32 durch eine Brücke ersetzt denken.

Vom Drain-Anschluß von T 1 erfolgt die Rückkopplung über den Spannungsteiler R 19 bis R 23 sowie R 16 auf den nicht invertierenden (+) Eingang (Pin 12) des OP 2. R 17, D 11 besitzen in diesem Zusammenhang lediglich eine Schutzfunktion. Die Verstärkung dieser zweiten Stufe beträgt, festgelegt durch die vorgenannten Widerstände, 43-fach. Hierdurch ergibt sich eine Gesamtverstärkung von 53 dB entsprechend 470fach, wobei die Gesamtverstärkung mit dem Poti R 13 einstellbar ist.

Ein weiterer Hochspannungs-Power-MOS-FET des Typs BUZ 50 B (T 2) stellt in seiner Zusatzbeschaltung (R 25 bis R 31, C 11, D 12) eine Konstantstromquelle dar, die einen positiven Strom von ca. 20 mA in die im A-Betrieb arbeitende mit T 1 aufgebaute



Innenansicht des High-End-Elektrostat-Kopfhörer-Verstärkers

Endstufe einspeist (R 32 überbrückt). Hierdurch arbeitet der eigentliche von der NF-Signalspannung angesteuerte Endstufen-transistor T 1 im reinen A-Betrieb, wodurch sich ein extrem klirr- und rauscharmes Ausgangssignal einstellt.

Die Gesamtstromaufnahme des EV 2000 ist durch den Brückenbetrieb für jeden Kanal doppelt so hoch, d. h. bei 2 Kanälen ergibt sich ein 4facher Strombedarf entsprechende 80 mA. Die daraus resultierende Verlustleistung beträgt somit allein in den Endstufen 80 W.

Durch einen schaltungstechnischen Kunstgriff konnte hier eine Halbierung auf jeweils 10 mA pro Endstufenzweig entsprechend einer Gesamtstromaufnahme von 40 mA erreicht werden. Hierzu dient R 32, der in Reihe zu R 31 eingefügt wurde. Die Rückkopplung sowie der Abgriff der Ausgangsspannung über C 15 ist am Mittelpunkt von R 31, R 32 abgenommen. Hierdurch ergibt sich eine genau definierte Steuerung der mit T 2 aufgebauten Stromquelle über die jetzt auftretende definierte Mitkopplung, ohne daß durch den halbierten Stromfluß dadurch eine Leistungsbeeinträchtigung auftritt.

Der Vergrößerung von R 32 und der damit verbundenen weiteren Reduzierung der Stromaufnahme sind jedoch Grenzen gesetzt, die aus Gründen der parasitären Kapazitäten unterhalb eines gewissen Mindeststromes zu Schwingneigungen der gesamten Anordnung führen. Mit der vorliegenden Dimensionierung befindet sich die Schaltung jedoch in einem ausgewogenen und stabilen Betriebszustand, der den Anforderungen in wohl optimaler Weise gerecht wird.

Über C 15 wird das mit einer Spitzenamplitude von 1000 V zur Verfügung stehende Ausgangssignal auf den Elektrostat-Kopfhörer gegeben. Da jedoch die doppelte Signalthöhe zur Vollaussteuerung erforderlich

ist, steht eine zweite, weitgehend identisch aufgebaute Endstufenhälfte zur Verfügung, die über C 14 mit dem zweiten Anschluß des Elektrostat-Kopfhörers verbunden wird.

Einziger jedoch wesentlicher Unterschied der zuerst beschriebenen Endstufenhälfte (bestehend aus OP 2, T 1, T 2 mit Zusatzbeschaltung) besteht in der um exakt 180° phasengedrehten Ansteuerung. Dies wird mit Hilfe des vorgeschalteten invertierenden Verstärkers OP 3 erreicht, dessen Verstärkungsfaktor exakt 1 beträgt bei gleichzeitiger Signalinvertierung.

Die hier vorliegende Brückenendstufe ist somit in der Lage, einen Elektrostat-Kopfhörer mit einer NF-Wechselspannung von ca. 700 V_{eff} entsprechend ca. 2000 V_{ss} anzu-steuern.

Das zweite Kopfhörersystem wird, wie bereits erwähnt, von einer identischen Schaltung angesteuert, d. h. insgesamt besitzt der EV 2000 4 Endstufenhälften mit zusammen 8 Hochspannungs-Power-MOS-FETs des Typs BUZ 50 B. Die Verlustleistung aller 8 Transistoren beträgt zusammen 40 W, weshalb eine entsprechende Kühlung unbedingt erforderlich ist, die im vorliegenden Fall aus Sicherheitsgründen mit den 8 Leistungskühlkörpern recht großzügig dimensioniert ist.

Zur Erkennung von Übersteuerungseffekten ist eine Clipping-Peak-Anzeige vorgesehen, deren Arbeitsweise wie folgt abläuft:

Über R 6 gelangt das vom Ausgang des Vorstufen-OP 1 kommende NF-Signal auf eine Komparator-Schaltung, bestehend aus OP 7 und OP 8. R 7 und R 8 dienen in Verbindung mit R 6 zur Spannungsteilung, während R 5, R 9 und R 10 die Komparatoransprech-schwellen festlegen. Sobald das Endstufen-Ausgangssignal in die Nähe der oberen Aus-steuergrenze kommt, wechselt der Pegel am Ausgang (Pin 8) des OP 7 von „High“ nach „Low“, und das Monoflop, bestehend aus

N 1, 2 mit Zusatzbeschaltung, wird über D 8 getriggert. In gleicher Weise schaltet der Ausgang (Pin 14) des OP 8, sobald sich die Ausgangsspannung der Endstufen in die Nähe der unteren Aussteuergrenzen bewegt.

Das Abfragen der Endstufen-Ausgangs-spannungen müßte normalerweise direkt von den Endstufenausgängen über einen entsprechenden Spannungsteiler erfolgen. Dies ist jedoch nicht unbedingt erforderlich, da ein direkter genau definierter, linearer Zusammenhang zwischen der Endstufen-Ausgangsspannung und der Spannung am Ausgang (Pin 1) des OP 1 besteht. Dieses wird durch die Dimensionierung der Widerstände zur Festlegung der Komparator-schwellen berücksichtigt, wodurch sich auf elegante Weise eine Peak-Anzeige realisieren läßt.

Das mit N 1, N 2 und Zusatzbeschaltung aufgebaute Monoflop besitzt eine Monozeit von ca. 0,5 Sekunden. Hierdurch wird jeder noch so kurze Übersteuerungspeak durch Aufleuchten der entsprechenden LED „Peak“ (D 16) angezeigt. Der Emitterfolger T 5 dient dem Ausgang (Pin 4) des Gatters N 1 als Puffer, und R 57 legt den Dioden-strom fest.

Da das für das Monoflop eingesetzte CMOS-IC des Typs CD 4011 die Versorgungsspannung von 24 V nicht verarbeiten kann, wurde mittels R 11, R 12 und D 10 eine Begrenzung dieser Versorgungsspannung auf ca. 15 V vorgenommen.

Zum Nachbau

Ein so außergewöhnliches Gerät wie der ELV-High-End-Elektrostat-Kopfhörer-Verstärker EV 2000 verlangt auch bei seiner Erstellung nach außergewöhnlichen Zuta-ten. Angefangen bei den neuartigen Hochspannungs-Power-MOS-FETs der Firma Siemens über besonders großzügig dimen-sionierte Kühlkörper mit extrem kapazitäts-armen und zugleich hochspannungsfesten

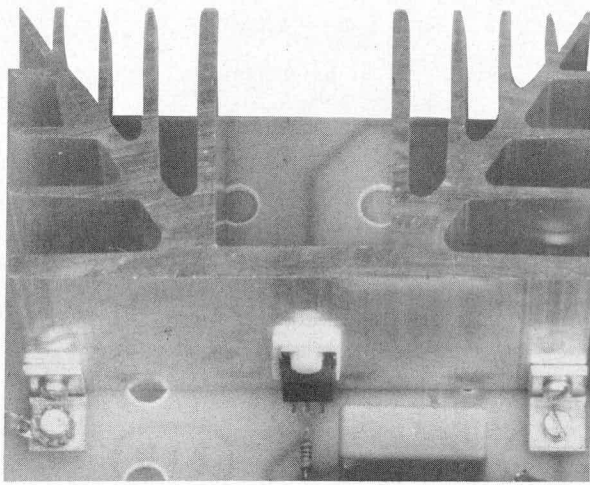


Bild 3: Einbau-Ansicht eines Alu-Leistungskühlkörpers

Siliziumoxid-Isolierscheiben, vollmetallgekapselte Lautstärkeinsteller, spezielle kapazitätsarme und hochspannungsfeste Ausgangsbuchsen bis hin zum soliden 19"-Gehäuse – alles Materialien nur vom Feinsten. Speziell dem Gehäuse kommt hierbei nicht zuletzt aus Stabilitätsgründen sowie aus Gründen der Abschirmung und des Berührungsschutzes eine wesentliche Bedeutung zu. 19"-Gehäuse ist hierbei nicht gleich 19"-Gehäuse. Zahlreiche auf dem Markt angebotene „Billigkonstruktionen“ kommen für dies edle Gerät selbstverständlich nicht in Frage. Die Ingenieure des ELV-Teams haben sich für eines der hochwertigsten auf dem Markt angebotenen, serienmäßig gefertigten 19"-Gehäuse eines der größten und bedeutendsten Gehäusehersteller entschieden.

Abgesehen vom ansprechenden Design zeichnet sich das Gehäuse durch einen sehr stabilen, massiven Front- und Rückrahmen mit dazwischen angeordneten ebenfalls sehr massiven Profilen aus. Die zwischen den seitlichen Gehäusewandungen oben und unten verlaufenden gelochten Tragschienen sind aus massiven Alu-Strangpreß-Profilen gezogen und geben der gesamten Konstruktion einen zusätzlichen sicheren Halt, der das Gehäuse auch extremen Belastungen standhalten läßt. Die Rückwand ist aus 3 mm starkem Aluminium mit Lüftungsschlitzen gefertigt.

Bei der Frontplatte handelt es sich um eine 3 mm starke rote Plexiglasscheibe, die von der Rückseite schwarz lackiert wurde und auf der Frontseite den lichtgrauen Informationsdruck trägt. Diese Druckkombination, die bei der ELV-Serie 7000 bereits seit vielen Jahren erfolgreich angewandt wird, ergibt eine fast schwarze, hochglänzende Frontplatte im Techniklook.

Doch kommen wir nun zum eigentlichen Nachbau des Gerätes.

Beginnen wir zunächst mit der Bestückung der Basisplatine. Zuerst werden die niedrigen Bauelemente (Brücken, Lötstifte, Widerstände, kleine Kondensatoren, ICs) auf die Platine gesetzt und auf der Leiterbahnseite verlötet. Es folgen der 24 V-Festspannungsregler, die größeren Kondensatoren einschließlich der Elkos sowie der kleine Netztransformator Tr 1.

Als nächstes sind an jeden der 8 Alu-Kühlkörper entsprechend der Abbildung 3 zunächst die beiden Alu-Befestigungswinkel mit 2 Schrauben M 3 x 8 mm und 2 Muttern M 3 anzuschrauben. Es folgt der Hochspannungs-Power-MOS-FET. Dieser wird unter Zwischenfügen einer Siliziumoxid-Isolierscheibe mit einer temperaturstabilen Kunststoffschraube M 3 x 15 mm sowie einer Kunststoffmutter M 3 an dem Kühlkörper befestigt. Hierzu wird der Transistor erst genau ausgerichtet und fest angedrückt. Die Kunststoffmutter ist gefühlvoll anzuziehen, damit das Gewinde nicht überdreht wird.

Zur besseren Wärmeabfuhr kann eine hauchdünne Schicht Wärmeleitpaste auf beiden Seiten der Isolierscheibe vor dem Einbau aufgebracht werden.

Als dann werden die 8 Kühlkörper an die entsprechenden Positionen der Basisplatine gesetzt, wobei gleichzeitig die 3 Anschlußbeinchen der Endstufentransistoren durch die zugehörigen Bohrungen zu führen sind. Die Verschraubung der Kühlkörper erfolgt über die Alu-Befestigungswinkel in Verbindung mit insgesamt 16 Schrauben M 3 x 6 mm sowie 16 M 3 Muttern mit der Basisplatine. Damit sich eine sichere leitende Verbindung der Kühlkörper zu den Leiterbahnen der Schaltungsmasse ergibt, ist pro Kühlkörper je eine Zahnscheibe vor dem Aufsetzen der Mutter auf der Leiterbahnseite einzufügen. Erst jetzt sind die Anschlußbeinchen der Endstufentransistoren auf der Leiterbahnseite zu verlöten. Überstehende Drahtenden sind wie bei allen anderen Bauelementen auch hier abzukneifen.

Von der Oberseite des 70 VA-Netztransformators Tr 2 aus werden 4 Schrauben M 4 x 55 mm durch die Bohrungen des Blechpaketes geführt. Auf der Trafounterseite (Lötstiftseite) sind 4 15 mm lange Abstandshülsen darüberzusetzen. Nun wird der Trafo an der entsprechenden Stelle auf die Basisplatine gesetzt, wobei gleichzeitig die 4 Lötanschlüsse sowie die 4 Befestigungsschrauben durch die dafür vorgesehenen Bohrungen zu stecken sind. Mit 4 Muttern M 4 erfolgt die stabile mechanische Befestigung auf der Platinenunterseite. Erst jetzt ist der elektrische Kontakt durch Verlöten der 4 Trafoanschlußstifte auf der Leiterplattenunterseite vorzunehmen.

An die Ausgangsbuchsen für den Anschluß von 1 oder 2 Elektrostat-Kopfhörern werden besonders hohe Anforderungen hinsichtlich Spannungsfestigkeit und Kapazitätsarmut gestellt. Hier wurde vom Hause Sennheiser eine Sonderentwicklung vorgenommen, die diesen hohen Anforderungen gerecht wird. Bei den Elektrostat-Kopfhörern der Firma Sennheiser sind die entsprechenden Stecker selbstverständlich bereits werkseitig angebracht. Für die Ausgangsseite stehen die Buchsen in einer in einem Kunststoffgehäuse integrierten Form zur Verfügung, d. h. Einzelbuchsen sind nicht erhältlich. Freundlicherweise hat sich das Haus Sennheiser dazu bereiterklärt, entsprechende Kunststoff-Gehäuseteile an ELV zu liefern, in denen gleich 2 Buchsen integriert sind. Diese Kunststoffteile wurden von ELV so aufbereitet, daß sie zum direkten Einbau mittels zweier Schrauben M 3 x 6 mm sowie 2 Muttern M 3 an der dafür vorgesehenen Stelle auf die Basisplatine zu setzen und zu verschrauben sind.

Die 4 Anschlüsse der beiden Buchsen werden über 2 möglichst kurze, jeweils 2 adrige, isolierte, abgeschirmte Leitungsabschnitte miteinander verbunden, so daß sie parallel geschaltet sind (der rechte Anschluß von Buchse 1 wird mit dem rechten Anschluß von Buchse 2, der untere Anschluß von Buchse 1 wird mit dem unteren Anschluß von Buchse 2 ... verbunden).

Abbildung 4 zeigt die Anschlußbelegung der Ausgangsbuchsen von der Rückseite aus (Lötseite) gesehen. Mit einer ca. 250 mm langen 2 adrigen, isolierten abgeschirmten Zuleitung wird die linke Brückenendstufe (die Endstufe, die hinter den Netztrafos angeordnet ist) mit den Ausgangsbuchsen verbunden. Hierzu wird der Platinenanschlußpunkt „eL“ der Basisplatine über eine der beiden Innenadern mit Pin 3 der linken Ausgangsbuchse verbunden und der Anschlußpunkt „fL“ der Basisplatine über die zweite Innenader mit dem Anschluß 5 der linken Ausgangsbuchse (Ausgang 1). Die Abschirmung dieser Zuleitung im Bereich der Ausgangsbuchse ist möglichst kurz zu halten und mit der Abschirmung der Verbindungsleitung zwischen den beiden Ausgangsbuchsen zu verlöten. Am Ende des letztgenannten nur ca. 40 mm langen Leitungsabschnittes wird das Abschirmgeflecht bis zur Ummantelung entfernt und anschließend isoliert. Ein Lötanschluß der Abschirmung an dieser Stelle (im Bereich der rechten Ausgangsbuchse) erfolgt nicht. Die ein-

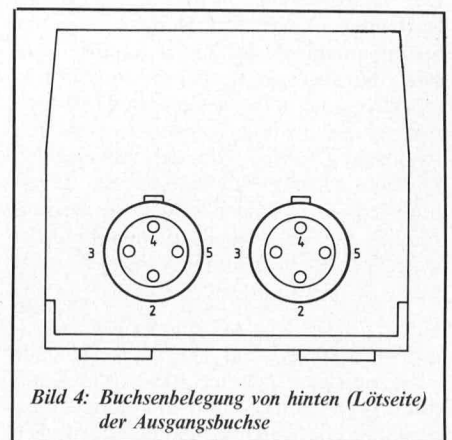


Bild 4: Buchsenbelegung von hinten (Lötseite) der Ausgangsbuchse

zige Stelle, an der die Abschirmung der Zuleitung für die linke Brückenendstufe mit der Schaltungsmasse verbunden wird, ist der Platinenanschlußpunkt „pL“. Dieser Anschlußpunkt befindet sich zwischen den Platinenanschlußpunkten „eL“ und „fL“.

Für die rechte Brückenendstufe dient eine ca. 200 mm lange 2adrige, isolierte, abgeschirmte Leitung, die in gleicher Weise die rechte Brückenendstufe mit den Ausgangsbuchsen verbindet, wie es bei der linken Brückenendstufe beschrieben wurde. Lediglich die Anschlußpunkte sind andere, d. h. der Platinenanschlußpunkt „eR“ ist mit dem Ausgangsbuchsenpunkt 4 und der Platinenanschlußpunkt „fR“ mit dem Ausgangsbuchsenpunkt 2 zu verbinden. Die Abschirmung im Bereich der Kühlkörper ist an den Punkt „pR“ auf der Basisplatine zu legen, während die Abschirmung dieser Zuleitung im Bereich der Ausgangsbuchse 2 mit der zugehörigen Abschirmung, welche die beiden Ausgangsbuchsen miteinander verbindet, zu verlöten ist. Auch hier wird die Abschirmung am Ende dieser ca. 40 mm langen Buchsenverbindungsleitung im Bereich der rechten Ausgangsbuchse bis zur Ummantelung entfernt und gut isoliert.

Zu beachten ist im Zusammenhang mit den Ausgangsbuchsenanschlüssen, daß hier Spitzenspannungen von rund 2000 V_{ss} auftreten und die Verbindungen deshalb gerade auch im Bereich der Buchsenanschlüsse sehr sorgfältig auszuführen sind. Die Abisolierungen der anzulötenden isolierten Leitungen sind so kurz als irgend möglich vorzunehmen, um die Gefahr von Spannungsüberschlägen in diesem Bereich zu minimieren.

Die Ausführung der besonders kritischen Rückkopplungsleitungen vom Ausgang der Endstufen über die Widerstände R 19 bis R 23 zurück zum Eingang der entsprechenden Verstärkerstufe ist ebenfalls über abgeschirmte Zuleitungen vorzunehmen. Der Platinenanschlußpunkt „jL“ im Bereich des Kühlkörpers der linken Brückenendstufe wird über eine ca. 300 mm lange 1 adrige isolierte, abgeschirmte Zuleitung mit dem Platinenanschlußpunkt „jL“ im Bereich der Operationsverstärker verbunden, d. h. die beiden Punkte gleicher Bezeichnung sind über die Innenader dieser Zuleitung gekoppelt. Die Abschirmung wird nur an einer Seite, und zwar an der Operationsverstärkerseite an den Platinenanschlußpunkt „kL“ angelötet, während die Abschirmung im Bereich der Kühlkörper entfernt und gut isoliert wird.

Die Verbindung der zweiten Brückenendstufenhälfte des linken Kanals erfolgt über eine ca. 200 mm lange 1 adrige isolierte, abgeschirmte Zuleitung in gleicher Weise, wobei die Platinenanschlußpunkte „iL“ miteinander zu verbinden sind. Der Anschluß der Abschirmung erfolgt in diesem Fall am selben Platinenanschlußpunkt „kL“ im Bereich der Operationsverstärker.

Für die Verkabelung der beiden Endstufenhälften des rechten Kanals geht man in gleicher Weise vor, wobei hier die Leitungslängen 120 mm bzw. 60 mm betragen und die Platinenanschlußpunkte anstelle des Zusatzes „L“ „R“ tragen.

Wesentliche Voraussetzung für die einwandfreie Funktion der Schaltung ist die

Verwendung von besonders hochwertigen, spannungsfesten und vor allen Dingen kapazitätsarmen Zuleitungen, da bereits wenige pF an zusätzlicher Kapazität den Frequenzgang beeinträchtigen können.

Ist die Basisplatine soweit fertiggestellt und nochmals sorgfältig kontrolliert, kann der Einbau ins 19“-Gehäuse erfolgen.

Durch die entsprechenden 9 Bohrungen der Basisplatine werden von der Bestückungsseite aus Schrauben M 3 x 15 mm gesteckt, mit 10 mm langen Kunststoffabstandshülsen auf der Leiterbahnseite versehen und durch die entsprechenden Bohrungen der Alu-Tragschienen in der Gehäuseunterseite gesteckt. Die mechanische Verbindung erfolgt über 9 Muttern M 3, die von der Gehäuseunterseite aus aufzuschrauben und festzuziehen sind. Damit die Stirnflächen der Abstandshülsen plan und vollflächig anliegen, sind sie an den Seiten bei Bedarf leicht anzuschrägen. Der Abstand zwischen Leiterbahnseite und Tragschienen beträgt somit 10 mm. Durch die Lagerung an 9 Punkten ergibt sich eine sichere und stabile Befestigung im Gehäuse.

Als nächstes können die beiden Leuchtdioden von der Frontplattenrückseite aus eingesetzt und verklebt werden. Es folgt das Einsetzen und Festschrauben des Netzschalters sowie des Stereo-Lautstärke-Einstellpotis, dessen Achse zuvor auf ca. 10 mm Länge zu kürzen ist. Die Einbaulage sollte so vorgenommen werden, daß die Anschlußstifte nach links weisen (zu den Ausgangsbuchsen hin). An die Anschlußstifte des Potis sind 2 ca. 100 mm lange 1 adrige, isolierte, abgeschirmte Zuleitungen anzulöten, wobei die Abschirmungen jeweils an den oberen Anschluß, und die Innenader an den mittleren Potianschluß zu legen ist. Der vordere Potiteil für die Regelung des linken Kanals wird später mit den Platinenanschlußpunkten „qL“ sowie „dL“ (Abschirmung) verbunden. Der hintere Potiteil zur Einstellung der Lautstärke des rechten Kanals wird in äquivalenter Weise mit den Platinenanschlußpunkten der Basisplatine verbunden („qR“: Innenader, „dR“: Abschirmung). Bevor diese Verbindungen auf der Basisplatine erfolgen, sollten jedoch die weiteren Anschlüsse der Bauelemente auf der Frontplatte in folgender Weise vorgenommen werden:

An die Leuchtdiode D 16 („Peak“) wird eine 2adrige isolierte Zuleitung mit einer Länge von 150 mm angelötet. Die Kontroll-LED D 5 (Ein) wird mit einer ca. 100 mm langen 2adrigen isolierten Zuleitung versehen.

Jetzt wird die 3adrige Netzzuleitung vorsichtig auf ca. 350 mm von der äußeren Ummantelung befreit, wobei sorgfältig darauf zu achten ist, daß die inneren Isolierungen keinesfalls beschädigt werden. Von der braunen und blauen Ader sind 2 50 mm lange Leitungstücke abzutrennen und an die beiden

Mittelschlüsse des Netzschalters (Kippschalter S 1) zu löten. Vom gelbgrünen Schutzleiter der Netzzuleitung ist ein 250 mm langes Leitungstück abzutrennen und auf einer Seite mit der Lötöse zu verbinden, die auf der Frontplatteninnenseite am Kippschaltherals angeschraubt wurde. Ein weiteres ebenfalls 250 mm langes Leitungstück wird von der braunen Ader der Netzzuleitung abgetrennt und mit einem der beiden unteren Netzschalteranschlüsse verlötet. Die soweit vorbereitete Frontplatte wird zunächst zur Seite gelegt, und wir wenden uns der Buchsenplatine und der Montage der Rückwand zu.

Zunächst werden die beiden Cinch-Buchsen von der Außenseite in die Gehäuserückwand gesetzt und auf der Innenseite mit je einer Mutter fest verschraubt unter Zwischenfügen einer Lötöse. Die Befestigung der beiden Lautsprecherbuchsen erfolgt mit je 2 Schrauben M 3 x 10 mm und 2 Muttern M 3, wobei die Buchsen selbst von der Innenseite an die Rückwand zu setzen sind.

Die Buchsenplatine ist mit den 4 Widerständen R 70 L, R 71 L, R 70 R, R 71 R sowie den beiden Elkos C 4 L und C 4 R zu bestücken. Es folgen die Brücken sowie der Kippschalter und die DIN-Buchse. Die Lötstifte sind von der Leiterbahnseite aus einzusetzen.

Vom Kippschaltherals wird die erste Mutter (Rändelmutter) abgeschraubt und die zweite Mutter so weit in Richtung Knauf gedreht, daß sie sich in der gleichen Höhe wie die Vorderseite der DIN-Buchse befindet (ungefähr in der Mitte des Gewindehalses).

Von der Außenseite der Gehäuserückwand sind 4 Schrauben M 3 x 25 mm durch die entsprechenden Bohrungen zu stecken, von der Innenseite mit 4 15 mm langen Abstandröllchen zu versehen, um anschließend durch die zugehörigen Bohrungen der Buchsenplatine gesteckt zu werden. Die Verschraubung erfolgt mit 4 Muttern M 3 von der Leiterbahnseite der Buchsenplatine aus. Als zusätzliche mechanische Befestigung dient die Rändelmutter des Kippschalters, die nun von der Außenseite der Gehäuserückwand aufzuschrauben ist. Die äußere sowie innere Befestigungsmutter des Kippschalters sind so festzuziehen, daß die Buchsenplatine möglichst nicht durchgebogen wird.

Der Anschluß der Buchsen an die Buchsenplatine ist aus Abbildung 5 ersichtlich und wird mit möglichst kurzen Silberdrahtabschnitten vorgenommen. Die Verbindung zum Lautstärke-Einstellpoti erfolgt über 2 ca. 250 mm lange 1 adrige isolierte, abgeschirmte Zuleitungen. Die Innenader der Zuleitungen wird an die Platinenanschlußpunkte „cL“ und „cR“ und die Abschirmung an die zugehörigen Platinenanschlußpunkte „dL“ und „dR“ der Buchsenplatine gelötet. Der Anschluß ans Potentiometer erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt, nachdem Front-

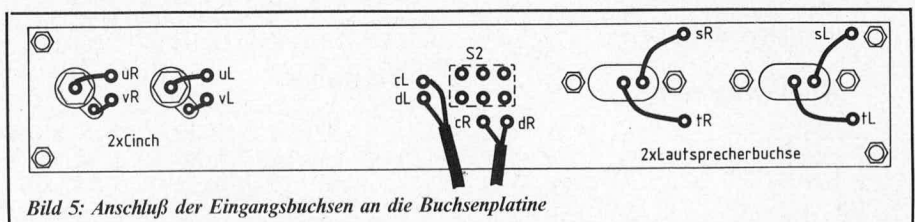


Bild 5: Anschluß der Eingangsbuchsen an die Buchsenplatine

und Rückplatte ans Gehäuse geschraubt wurden.

Zunächst sind jetzt der Sicherungshalter sowie die Netzkabeldurchführung mit Zugentlastung und Knickschutztülle in die entsprechenden Bohrungen der Gehäuserückwand zu setzen und zu verschrauben. Ist dies erfolgt, kann die Gehäuserückwand am Gehäuse angeschraubt werden.

Die in weiter vorstehend beschriebener Weise bearbeitete 3adrige Netzzuleitung wird durch die Netzkabeldurchführung gesteckt, wobei sie zur leichteren Montage zunächst weiter als später erforderlich durchgesteckt werden kann. Ein Festziehen der Zugentlastung erfolgt daher zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht.

Die ca. 300 mm lange blaue Ader der Netzzuleitung wird auf 250 mm gekürzt und an den zweiten noch freien unteren Anschluß des Netzschalters S 1 angelötet.

Nun erfolgt der Einbau der Frontplatte, d. h. sie wird mittels 4 Schrauben M 4 x 8 mm an der Gehäusevorderseite festgeschraubt.

Die Netzzuleitung ist in die endgültige Position zu bringen, d. h. sie wird so weit zurückgezogen, daß ungefähr 20 mm von der äußeren Ummantelung ins Gehäuseinnere ragen. Wesentlich ist in jedem Fall, daß keine der Leitungen unter mechanischer Beanspruchung steht. Danach wird die Zugentlastung festgezogen. Die vom Netzschalter kommende braune Ader wird am äußeren Anschluß der Einbausicherung angelötet, während der innere Pol des Sicherungshalters direkt mit dem noch ca. 50 mm langen braunen Leitungsende der Netzzuleitung direkt zu verbinden ist.

Unmittelbar hinter dem Eintritt der Netzzuleitung ins Gehäuse an der oberen Alu-Befestigungsschiene wird an der nach unten weisenden Seite eine 3 mm Lötöse mit einer Schraube M 3 x 8 mm und einer Mutter M 3

befestigt. An diese Lötöse wird der noch ca. 100 mm lange gelbgrüne Schutzleiter der Netzzuleitung sowie der ca. 250 mm lange, vom Kippschaltherals kommende, gelbgrüne Schutzleiter angelötet.

An der im Bereich der Frontplatte verlaufenden oberen Alu-Befestigungsschiene wird ebenfalls, ca. 20 mm vom linken Profilende entfernt, in gleicher Weise eine Lötöse angeschraubt. Über eine flexible isolierte Leitung mit einem Querschnitt von mindestens 0,75 mm² wird diese Lötöse mit der zuvor genannten mit dem Schutzleiter verbundene Lötöse gekoppelt. Beide oberen Alu-Befestigungsschienen sind jetzt galvanisch mit dem Schutzleiter gekoppelt. Auf besonders sorgfältige Lötungen ist zu achten.

Eine weitere ca. 120 mm lange flexible, isolierte Leitung führt von der mit dem Schutzleiter der Netzzuleitung verbundenen Lötöse zu einer in der Nähe liegenden Lötöse, die unter einer Schraube zur Kühlkörperbefestigung liegt und dadurch mit der Schaltungsmasse verbunden ist. Die Schaltungsmasse des EV 2000 ist jetzt direkt mit dem Schutzleiter der Netzzuleitung gekoppelt.

Alle Metallteile des „19“-Gehäuses müssen miteinander in leitender Verbindung stehen. Aus diesem Grund ist im Bereich der Verschraubungen von den Seitenteilen zu den Aluprofilen sowie zur Front- und Rückplatte die Lackierung sorgfältig zu entfernen, um sichere elektrische Verbindungen zu gewährleisten.

Die beiden von der Kontroll-LED D 5 kommenden Leitungsenden sind an die Platinenanschlußpunkte „n“ und „o“ und die beiden von D 16 („Peak“) kommenden Leitungsenden an die Platinenanschlußpunkte „g“ und „h“ zu löten.

Die innere Ader der 1 adrigen isolierten abgeschirmten Zuleitung, die vom Platinenanschlußpunkt „cL“ der Buchsenplatine kommt, ist an den unteren Potianschluß der

vorderen Potihälfte zu legen, während die Abschirmung mit dem oberen Potianschluß derselben Potihälfte zu verbinden ist. In gleicher Weise wird die Innenader vom Platinenanschlußpunkt „cR“ der Basisplatine mit dem unteren Anschluß der hinteren Potihälfte verbunden und die zugehörige Abschirmung an den oberen hinteren Potianschlußpunkt gelegt.

Damit ist die Verkabelung soweit abgeschlossen. Nach dem Aufsetzen und Verschrauben von Gehäuseober- und Gehäuseunterteil steht dem Einsatz dieser interessanten Schaltung nichts mehr im Wege.

Achtung! Wichtiger Hinweis

Der Aufbau dieses Gerätes darf ausschließlich von versierten Fachleuten vorgenommen werden, die aufgrund ihrer Ausbildung dazu befugt sind und bestens mit den einschlägigen Sicherheits- und VDE-Bestimmungen vertraut sind.

Im Gehäuseinneren treten Spannungen von rund 2000 V auf, die in höchstem Maße lebensgefährlich sind, da sie sehr stabil sind und größere Leistungen und Ströme liefern können, d. h. die Spannungen brechen bei einer Berührung nicht in einer Weise zusammen, wie man es zum Teil aus dem Bereich des Hochspannungstrafos in der Fernsehtechnik gewohnt ist.

Das Gerät darf ausschließlich mit der Netzspannung verbunden werden, wenn es sich in einem geschlossenen mit Schutzleiter verbundenen Metallgehäuse befindet. Auch nach dem Ziehen des Netzsteckers muß mindestens eine Zeitspanne von 10 Minuten abgewartet werden, bevor das Gehäuse geöffnet werden darf, damit die großen Ladekondensatoren Zeit zum Abbau der lebensgefährlichen Spannungen haben.

Bei unsachgemäßer Behandlung besteht größte Lebensgefahr!!!

High-End-Elektrostat-Köpfungerverstärker EV 2000

Widerstände

1 Ω	..... R 71rl
15 Ω/4 W	..... R 70rl
100 Ω	..... R 30rl, R 39rl
470 Ω	... R 31rl, R 32rl, R 40rl, R 41rl
1 kΩ	..... R 11
1,5 kΩ	..... R 57
2,2 kΩ	... R 24rl, R 33rl, R 43rl, R 44rl
3,9 kΩ	..... R 1
4,7 kΩ	..... R 18rl, R 50rl
10 kΩ	... R 12, R 14rl, R 17rl, R 45rl, R 47rl, R 49rl
12 kΩ	..... R 16rl, R 48rl
47 kΩ	..... R 9, R 56
100 kΩ	... R 2-R 8, R 10, R 15rl, R 19rl-R 23rl, R 42rl, R 46rl, R 51rl-R 55rl
220 kΩ	..... R 25rl-R 29rl, R 34rl-R 38rl
1 MΩ	..... R 58-R 69
10 kΩ, Poti, 6 mm, Stereo	..... R 13rl

Kondensatoren

22 pF	..... C 7rl
220 pF	..... C 9rl, C 19rl
1 nF	..... C 10rl, C 12rl

10 nF/1600 V	..... C 14rl, C 15rl
22 nF/Keramik	..... C 25
47 nF	..... C 2
1 µF/16 V	..... C 4rl, C 5rl
4,7 µF/16 V	..... C 6rl
10 µF/16 V	..... C 3, C 11rl, C 13rl, C 16rl, C 17rl, C 20
100 µF/350 V	..... C 21-C 24
1000 µF/40 V	..... C 1

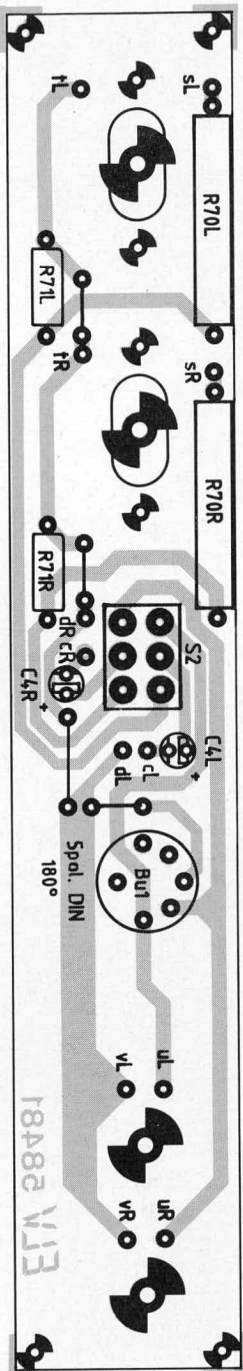
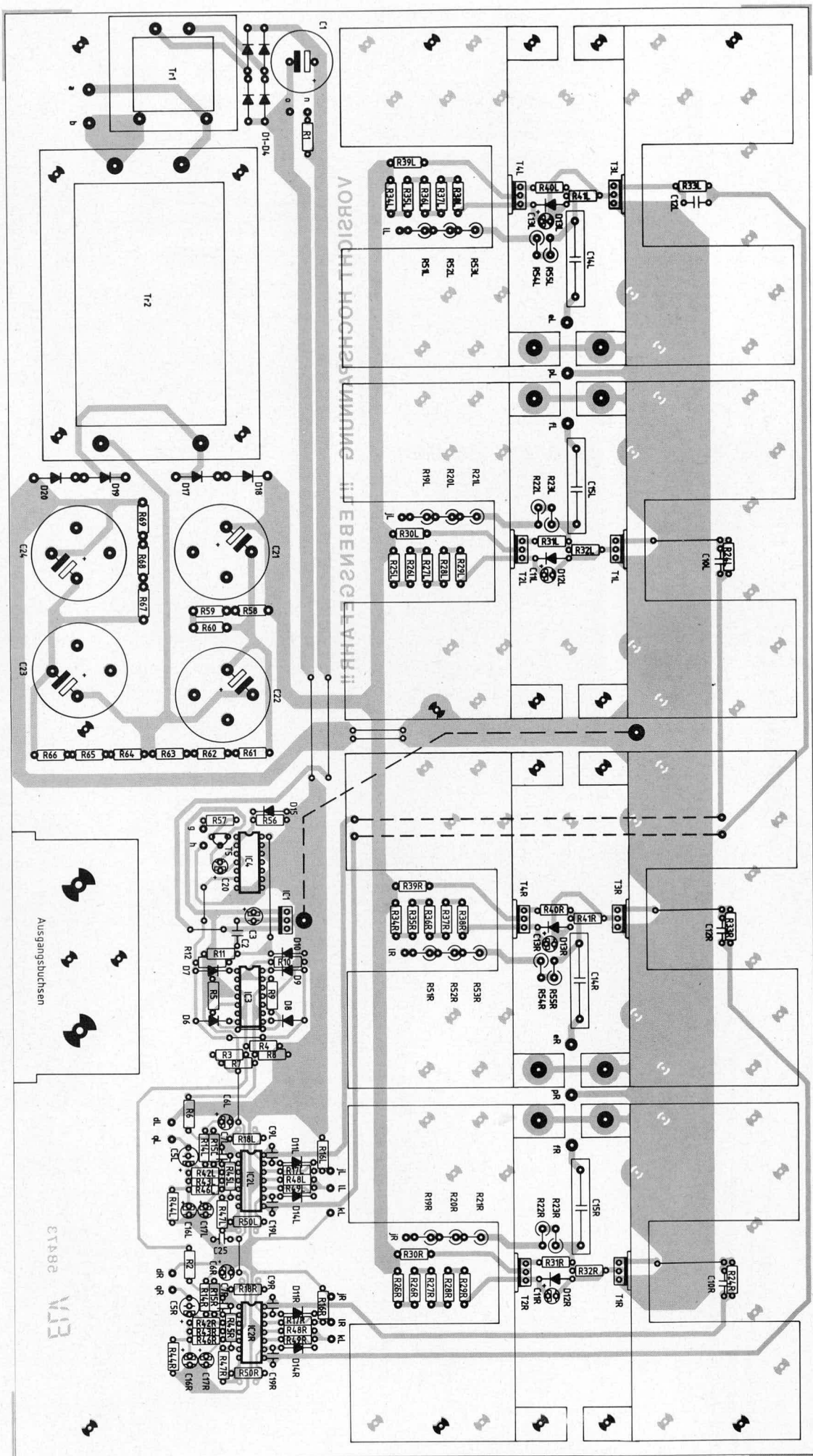
Halbleiter

TL 084	..... IC 2rl, IC 3
CD 4011	..... IC 4
7824	..... IC 1
BUZ 50 B	..... T 1rl-T 4rl
BC 548	..... T 5
ZPD 12	..... D 12rl, D 13rl
ZPD 15	..... D 10
DX 400	..... D 11rl, D 14rl
1N4007	..... D 17-D 20
1N4148	... D 1-D 4, D 6-D 9, D 15rl
LED, 5 mm, rot	..... D 5, D 16

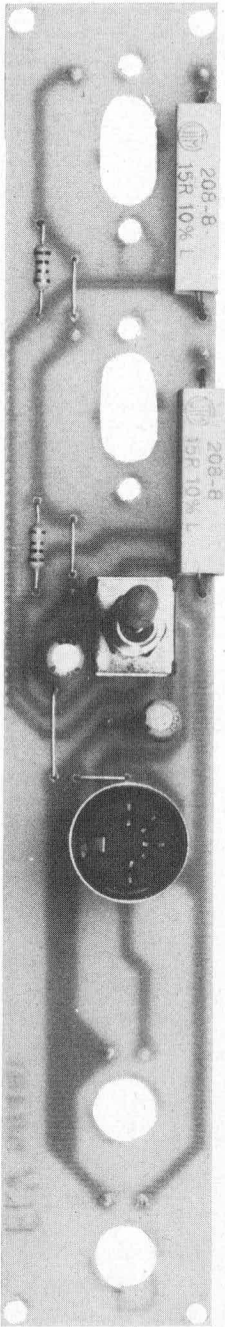
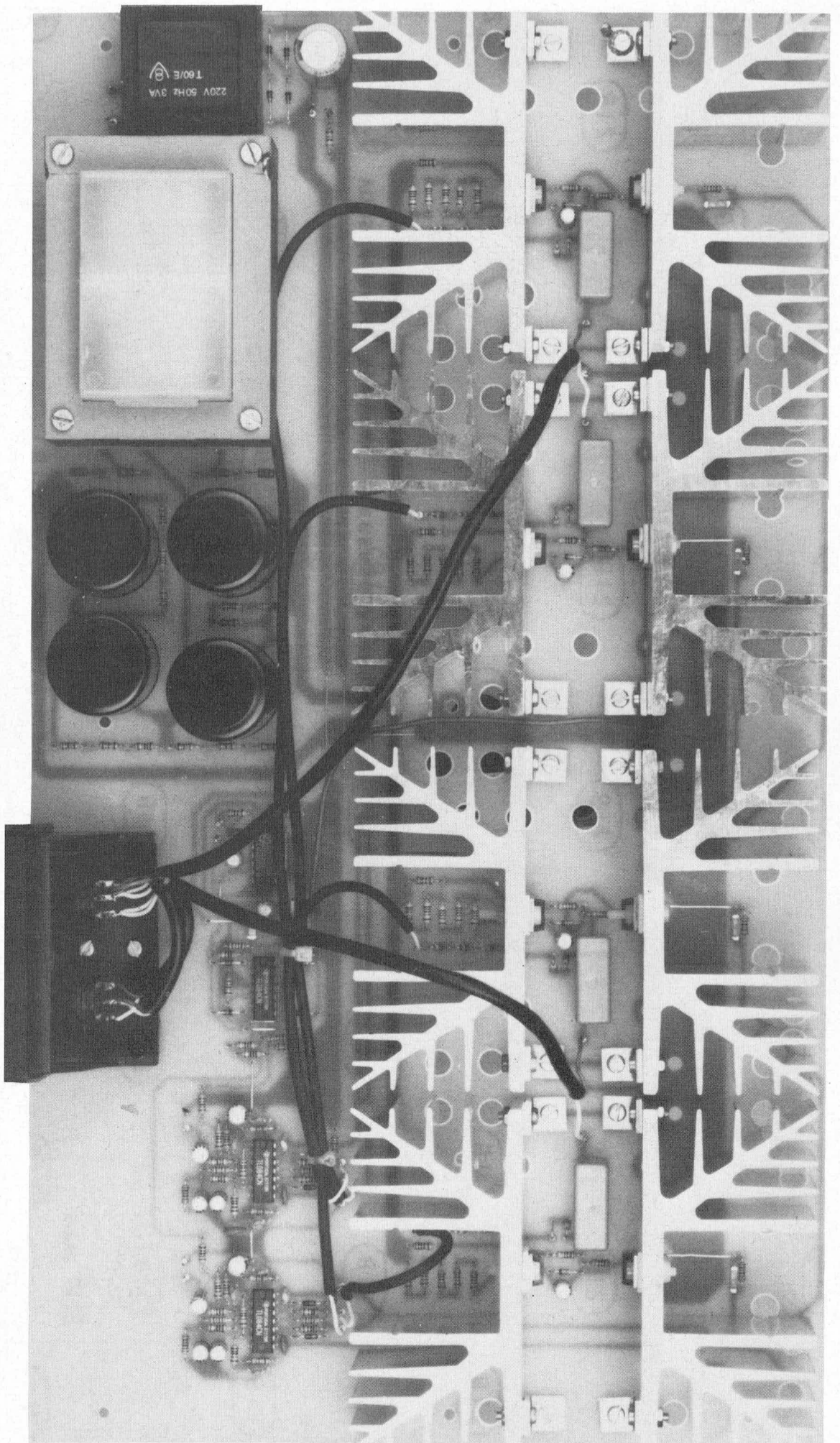
Sonstiges

Trafo prim.: 220 V/3 VA	
sec.: 24 V/125 mA	..... Tr 1
Trafo prim.: 220 V/70 VA	
sek.: 350 V/200 mA	..... Tr 2

Kippschalter 2 x um	..... S1, S 2
18 Schrauben M 3 x 6	
21 Schrauben M 3 x 8	
9 Schrauben M 3 x 15	
4 Schrauben M 3 x 25	
4 Schrauben M 4 x 55	
8 Kunststoffschrauben M 3 x 15	
8 Kunststoffmutter M 3	
49 Mutter M 3	
4 Mutter M 4	
3 Lötösen 3,2 mm	
1 Lötöse 6,2 mm	
8 Zahnscheiben für M 3	
9 Abstandsröllchen 10 mm	
8 Abstandsröllchen 15 mm	
1 5 pol Einbaubuchse	
2 Lautsprecherbuchsen	
2 Cinchbuchsen	
1 Einbausicherungshalter	
1 Sicherung 1 A, flink	
35 Lötstifte	
1 Netzkabeldurchführung mit Knickschutz	
8 Kühlkörper SK 88	
16 Aluwinkel	
8 Siliziumoxid-Isolierscheiben	
140 cm 1adrige abgeschirmte Leitung	
50 cm 2adrige abgeschirmte Leitung	
40 cm flexible Leitung 0,75 mm ²	



oben: Bestückungsplan der Basisplatte des High-End-Elektrostat-Kopf-
 hörer-Verstärkers (Originalgröße: 430 mm x 240 mm)
 links: Bestückungsplan der Buchsenplatte des High-End-Elektrostat-
 Kopfhörer-Verstärkers (Originalgröße)



oben: Ansicht der fertig bestückten Basisplatte des High-End-Electrostar-Kopfhörer-Verstärkers (Originalgröße: 430 mm x 240 mm)
 links: Ansicht der fertig bestückten Buchsenplatte des High-End-Electrostar-Kopfhörer-Verstärkers (Originalgröße)