

20 Watt Klasse-A-Verstärker

Erklärtes Ziel dieser Bauanleitung ist es, ohne Kompromisse und mit einem vertretbaren Aufwand einen Verstärker zu entwerfen, der höchsten Ansprüchen genügt. Um das zu erreichen, müssen einige Vorbedingungen erfüllt sein. Das Schaltungskonzept und die Bauteileauswahl müssen von vornherein auf diesen Gesichtspunkt ausgerichtet werden. Die Schaltung muß bereits ohne Über-Aller-Gegenkopplung niedrige Klirrwerte aufweisen, so daß auf übermäßig starke Gegenkopplung, die wiederum Stabilitätsprobleme und zunehmende Verzerrungen bei transienten Vorgängen bringt, verzichtet werden kann. Die einzelnen Stufen müssen deshalb mit nur geringer örtlicher Gegenkopplung bereits gute Ergebnisse liefern, um mit wenigen solcher Stufen eine hohe Leerlaufverstärkung zu erreichen.

Für die Endstufenschaltung eignen sich hierfür besonders FETs in Klasse-A-Einstellung. Ihre ab einem geringen Sourcestrom annähernd lineare Kennlinie läßt den Vorteil des Klasse-A-Verstärkers — mit fallender Aussteuerung gegen Null gehender Klirrfaktor — gut zur Geltung kommen. Zusätzlich sind sie wegen des theoretisch unendlichen Eingangswiderstandes einfach und problemlos anzusteuern, was die Schaltung gegenüber bipolaren Transistoren mit ihrem recht hohen Bedarf an Steuerstrom wesentlich vereinfacht.

K. Lang

Weitere Vorteile von FETs sind der fehlende 'Secondary Breakdown' und der positive Temperaturkoeffizient. Beides zusammen bedingt eine hohe Betriebssicherheit ohne zusätzliche Schaltungsmaßnahmen wie Strombegrenzung oder Temperaturkompensation und problemlose Parallelschaltung zur Erhöhung der Gesamt-Strombelastbarkeit.

Bei FETs finden keine Ladungsspeicherungen in den PN-Übergängen statt; sie sind deshalb wesentlich schneller als bipolare Transistoren zu schalten, was eine höhere Grenzfrequenz bedeutet. Aus dem gleichen Grunde haben sie nach einer Übersteuerung eine kürzere 'Recovery Time', was sich besonders bei kurzen Überbeanspruchungen positiv auf das Übertragungsverhalten auswirkt.

Gegen eine Klasse-A-Endstufe sprechen die immens hohe Verlustleistung, der schlechte Wirkungsgrad und ein im Vergleich zu anderen Endstufenschaltungen schlechtes Verhältnis von Preis und Ausgangsleistung. Dies rührt hauptsächlich von den relativ hohen Kosten für die erforderlichen Kühlkörper und Netzteile her. All dies wird jedoch keinen echten Klasse-A-Fan von seiner Philosophie und dem Nachbau

dieser Schaltung abbringen, denn ein guter Klang ist für ihn das Wichtigste. Zudem ist gerade bei hochwertigen Endstufen die Preisersparnis gegenüber Fertiggeräten besonders groß, vergleichbare A-Verstärker kosten nämlich im Handel etwa das 5- bis 10fache!



Netzteile

Da die Kaskodenschaltung der Vorstufen eine recht hohe Versorgungsspannung benötigt, andererseits die Versorgungsspannung der Endstufe wegen der Verlustleistung möglichst klein gehalten werden soll, sind hier zwei Versorgungsspannungen vorgesehen. Der Mehraufwand dient gleichzeitig einer höheren Schwingsicherheit und einem verbesserten Übersprechen.

Für die Vor- und Treiberstufen wird ein Standard-Doppelnetzteil verwendet, wie es in elrad bereits mehrfach veröffentlicht wurde (z. B. elrad 10/82 oder elrad Special 3). Der Strombedarf ist minimal; er beträgt etwa 12 mA je Kanal.

Das Endstufen-Netzteil ist unreguliert und — absichtlich — ohne Strombegrenzung, um die Klangeigenschaften des Verstärkers nicht zu verschlechtern. Die Spannung beträgt ± 20 Volt, der Strombedarf mindestens 3,6 A pro Kanal. Zum Schutz der robusten FETs

Technische Daten

Sinusdauerleistung an 4 Ohm	20 Watt
Leistungsbandbreite	
20 Hz — 20 kHz	+0—0,5 dB
10 Hz — 60 kHz	+0—3 dB
Eingangsspegel für Vollaussteuerung	0,775 V = 0 dB
Spannungsverstärkung	12,6fach = 22 dB
Eingangsimpedanz	40 kOhm
Fremdspannungsabstand (bezogen auf 100 mW an 4 Ohm)	
unbewertet	—66 dB
'A'-bewertet	—90 dB
Klirrabstand	
bei Vollaussteuerung	—84 dB
bei 5 Watt an 4 Ohm	—100 dB
Intermodulationsabstand (Sinus 19 kHz + 20 kHz; 1:1; Vollaussteuerung)	—79 dB
TIM-Abstand (Rechteck 3,18 kHz + Sinus 15 kHz; 4:1; Vollaussteuerung)	—80 dB
Maximale Verlustleistung (ohne Aussteuerung)	80 Watt je Kanal
Ruhestrom	2 A je Kanal

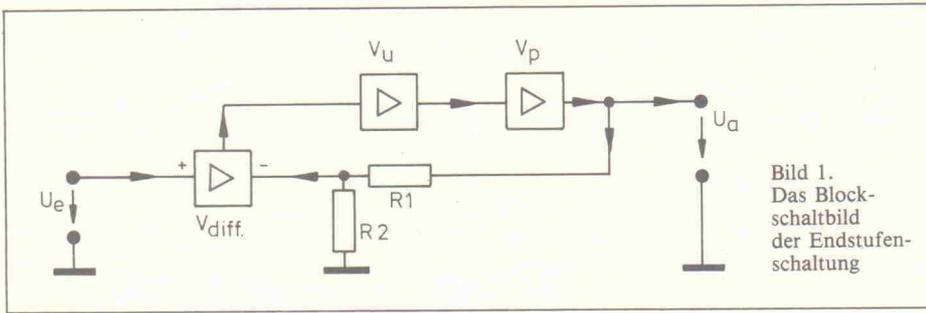


Bild 1. Das Blockschaltbild der Endstufenschaltung

genügen einfache Schmelzsicherungen für den Kurzschlußfall bzw. bei Unterimpedanz. Die Schaltung des Netzteils zeigt Bild 3.

Aufbau und Abgleich

Vor dem eigentlichen Bestücken der Platine sollten noch einige Vorarbeiten geleistet werden. Dazu gehört zu allererst das Bohren der Löcher in den Montagewinkel und in den Kühlkörper. Man spannt dazu den Kühlwinkel auf die noch unbestückte Platine und bohrt die für die FETs benötigten Löcher gemeinsam. Dies garantiert später einen problemlosen Zusammenbau von Platine und Kühlwinkel. Anschließend spannt man den Kühlwinkel auf den eigentlichen Kühlkörper und bohrt auch hier die Befestigungslöcher vor. Die Spule L1 wird angefertigt, indem man 15 Windungen Kupfer/Lackdraht über den Widerstand R29 wickelt und dann direkt am Widerstandsgehäuse mit dessen Anschlußdraht verlötet.

Die beiden benötigten Netzteile sollten ebenfalls vorher aufgebaut und getestet werden. Zwei Netzteile sind übrigens die Minimallösung; zu empfehlen sind getrennte Netzteile für jeden Kanal, also vier. Der Aufbau des stabilisierten Doppelnetzteils nach einer der zahlreichen Standardschaltungen ist einfach, Schwierigkeiten könnte es aber beim Besorgen des Trafos für das Endstufenetzteil geben. Für Stereobetrieb muß dieser immerhin 7–8 A abgeben können, für Mono immer noch mindestens 3,6 A.

Jetzt geht es an das Einlöten der Bauteile der Verstärkerplatine. In bekannter Reihenfolge werden Widerstände, Kondensatoren, Dioden und Transistoren eingelötet. Dabei werden die Gatewiderstände der FETs und die Keramik-Siebcondensatoren auf der Lötseite der Platine angelötet, um die Leitungslänge zwischen diesen Bauelementen und den FETs möglichst klein zu halten. Die MOSFETs selbst werden mit Glimmerscheiben, Isoliernippeln

und viel Wärmeleitpaste in die Löcher auf dem Kühlwinkel eingepaßt, Winkel und FETs mit der Platine verschraubt und dann (!) erst verlötet. Die Montageanordnung zeigt Bild 4.

Nach einer optischen Überprüfung der Platine auf Richtigkeit der Bestückung (Polarität), Kurzschlüsse und Unterbrechungen kommen wir zum Abgleich. Dieser beschränkt sich auf das Einstellen des Ruhestroms der Endstufe. Zuerst wird mit dem Ohmmeter überprüft, ob der Widerstand über den beiden Anschlußpunkten des 10-Gang-Potentiometers P3 0 Ohm beträgt, ansonsten wird P3 entsprechend verstellt.

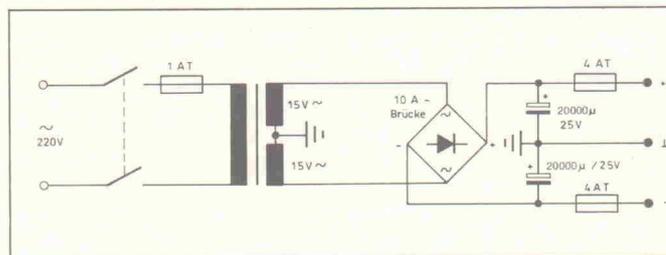


Bild 3. Das Netzteil für die Endstufe. Für die Treiber und Vorstufen wird noch eine gering belastbare \pm -Versorgung benötigt.

Anschließend können die Netzteile angeschlossen und (ohne Boxen) die Betriebsspannung eingeschaltet werden. Wenn vorhanden, kann man dazu beim ersten Mal zwei Netzteile mit Strombegrenzung verwenden, um größeren Schaden im Fehlerfall auszuschließen. Ansonsten geht's auch ohne, die FETs sind, wie bereits erwähnt, sehr robust und nicht so leicht zu zerstören. Geht das ohne Rauchzeichen vor sich, ist die Endstufe bereits betriebsbereit — im Klasse-B-Betrieb. Nach dem Einschleifen eines Amperemeters in eine Versorgungsleitung der Endstufe wird jetzt durch Verdrehen von P3 der Ruhestrom auf 2 A eingestellt. Da sich die FETs und der Kühlkörper jetzt stark erwärmen (bis zu 90 Grad Celsius), wird der Ruhestrom nach etwa 10 Minuten nachgeregelt; er sollte zwischenzeitlich auf etwa 1–1,5 A gefallen sein. Die Endstufe ist auch mit jedem anderen Ruhestrom zwischen 0 und 2 A einsatzfähig und wird

dann im B- bzw. im AB-Bereich betrieben. Sie hat dann einen höheren Wirkungsgrad, klingt jedoch auch schlechter als im reinen A-Betrieb.

Bevor man die Endstufe in Betrieb nimmt, sollte man dann noch den Ausgang mit dem Voltmeter auf Spannungsfreiheit prüfen. Die Ausgangsgleichspannung sollte 20 mV nicht überschreiten.

Zum Einbau in ein Gehäuse bietet es sich an, die Kühlkörper direkt als Seitenteile zu verwenden, mit Profilschienen zu verbinden und sich passende Bleche für Unter- und Oberteil, Vor- und Rückwand zuzuschneiden. In den freien Raum in der Mitte passen dann die Netzteile. Die Gleichrichter werden direkt auf das Bodenblech montiert, Ein- und Ausgangsbuchsen sowie die drei Einbau-Sicherungshalter gehören auf die Rückwand.

Fazit

Die Bauanleitung zeigt, daß sich mit verhältnismäßig geringem Bauteileaufwand ein hervorragender Klasse-A-Verstärker für audiophile Anwendungen

bauen läßt. Die Hochwertigkeit des Verstärkers ist dabei keineswegs auf irgendwelche schaltungstechnischen 'Geniestreiche' zurückzuführen, sondern lediglich auf die konsequente

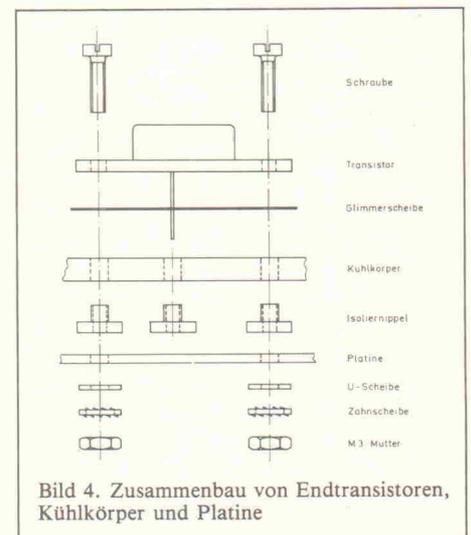
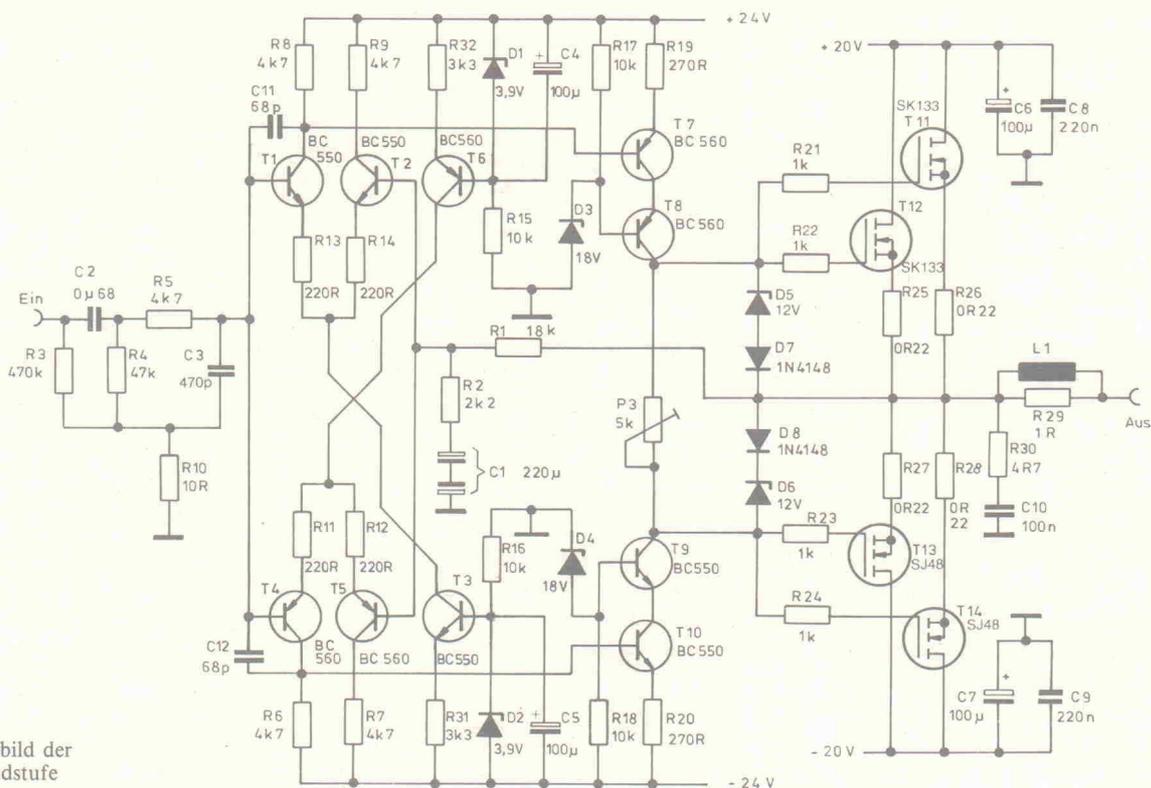


Bild 4. Zusammenbau von Endtransistoren, Kühlkörper und Platine



Das Schaltbild der 20W-A-Endstufe

Beachtung einfacher Konstruktionsmaßnahmen wie maßvolle, aber richtige Gegenkopplung, Vermeidung von TIM durch rein passive Bandbegrenzung usw. Die hervorragenden Meßwerte sind jedoch immer noch kein Maß dafür, wie gut ein solcher Verstärker 'klingt'. Beim subjektiven Hörempfinden müssen heute noch unbekannte Kriterien eine Rolle spielen, die meßtechnisch immer noch nicht zu erfassen sind. Nach dem heutigen Erkenntnisstand jedoch erzeugen schnell

le Klasse-A-Verstärker am ehesten ein dem Zuhörer gefälliges Klangbild. Abschließend wäre vielleicht noch zu bemerken, daß der beste Klasse-A-Verstärker nur so gut klingt wie die Boxen, die er ansteuert. Es sollten also qualitativ hochwertige, wegen der relativ geringen Ausgangsleistung schalldruckstarke Boxen, z. B. Hörner, verwendet werden. Erst dann kann ein A-Verstärker seine Überlegenheit unter Beweis stellen. Charlie Antolini läßt schön grüßen.

einerseits und über R4,5,10 andererseits auf Masse und damit auf null Volt, da hier im Ruhezustand kein Strom fließt.

Die Konstantstromquellen sind durch R31,32 auf etwa 1 mA eingestellt. Dies ist ein guter Mittelwert zwischen dem mit dem Strom zunehmenden Rauschen der Transistoren und den Verzerrungen, die die einseitige Belastung der Differenzverstärker durch den Strombedarf der Treibertransistoren hervorruft.

Die Treiberschaltung selbst ist eine bipolare Gegendakt-Kaskodenschaltung, bestehend aus den Transistoren T7—T10. In diesen Schaltungsteil wurde die meiste Entwicklungsarbeit gesteckt. Nach umfangreichen Erprobungen und Messungen von sechs (!) verschiedenen Treiberschaltungen wurde die bipolare Kaskode ausgewählt. Schlechter schnitten beispielsweise einfache Gegendakt-Schaltungen, Gegendakt-Darlington- oder VMOS-Treiber ab.

Die Kaskoden erhalten ihre Vorspannung aus den Konstantspannungsquellen aus R17,18 und D3,4. Ihre Steuerung erfolgt direkt mit dem Spannungsabfall über den Kollektorwiderständen der Differenzverstärker.

Der Ruhestrom durch die Kaskoden wird ebenfalls durch diese Spannung eingestellt und ist damit vom Ruhestrom der Differenzverstärker abhängig. Im Ruhestromkreis der Kaskoden liegen noch das Poti P3 und die Emitterwiderstände R19,20, die

Wie funktioniert's?

Das Blockschaltbild des Verstärkers zeigt Bild 1. Darin sind die drei vorhandenen Verstärkerstufen (Differenzverstärker, Spannungs- und Leistungsverstärker) enthalten. Für eine hohe Open Loop-Verstärkung ($V_{ol} \gg 100$) läßt sich die Closed Loop-Verstärkung V_{cl} näherungsweise bestimmen.

$$V_{cl} = \frac{U_a}{U_e} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Die Gesamtkonzipierung wird durch diese einfache Beziehung wesentlich vereinfacht, und umfangreiche Berechnungen zur Bestimmung der Gesamtverstärkung werden überflüssig.

Auffallend an der Schaltung ist vor allem der vollständig symmetrische Aufbau, der zur Verringerung der Verzerrungen erheblich beiträgt. Die Eingangsstufe ist ein Differenzver-

stärker, eine bereits ohne besondere Maßnahmen verzerrungsarme Schaltung. Deshalb kann die Gegenkopplung durch die Emitterwiderstände R11—R14 relativ gering ausfallen und damit eine hohe Leerlaufverstärkung erreicht werden. Der Differenzverstärker bietet den weiteren Vorteil, daß die Über-Alles-Gegenkopplung einfach durch Rückführung des Signals über einen Spannungsteiler auf den zweiten Eingang des Differenzverstärkers erfolgen kann.

Die zwei Differenzverstärker arbeiten auf zwei Konstantstromquellen (R31,32, C4,5, T3,6, D1,2); damit werden die Arbeitspunkte festgelegt und von der Betriebsspannung entkoppelt.

Der symmetrische Aufbau dient hier außerdem zur gegenseitigen Basisstromversorgung der Transistoren. Das Basisruhepotential liegt über R2

für eine leichte Gegenkopplung der ebenfalls sehr verzerrungsarmen Kaskoden sorgen.

Der Ruhestrom durch die Kaskoden liegt bei etwa 10 mA, um auch bei hohen Frequenzen den Strombedarf (!) der FETs aufgrund ihrer Kanalkapazitäten decken zu können.

Der Treiberuhestrom stellt mit dem Spannungsabfall über P3 die geringe Gegenkopplung und gleichen Exemplarstreuungen der FETs aus. Die Widerstände R21—R24 und die Kondensatoren C6—C9 beugen der Schwingneigung der Endstufe vor und sollen möglichst nahe an den FETs montiert werden. Auch die ausgangsseitigen RL- bzw. RC-Glieder aus R29,30, C10 und L1, die eine kapazitive oder induktive Belastung der Endstufe durch die Lautsprecher mindern, beugen dieser Schwingneigung vor. Die Dioden D5—D8 sind Schutzdioden, die ein Ansteigen der Gate-Source-Spannung auf unzulässige Werte bei Übersteuerung oder ausgangsseitigem Kurzschluß verhindern.

Der Arbeitspunkt und die Versorgungsspannung der Endstufe berechnen sich folgendermaßen:

$$P_{\text{aus}} = 20 \text{ W} \Rightarrow$$

$$U_{\text{aus}} = \sqrt{P_{\text{aus}} \cdot R_L} = 8,94 \text{ V}_{\text{eff}}$$

$$\Rightarrow U_{\text{aus}} = \sqrt{2} \cdot 8,94 \text{ V}_{\text{eff}} = 12,65 \text{ V}_{\text{ss}}$$

$$I_{\text{AUS}_{\text{SS}}} = U_{\text{aus}_{\text{SS}}} \cdot \frac{1}{R_L} = 3,16 \text{ A}$$

$$\approx 1,58 \text{ A je Endstufenzweig}$$

Gewählter Ruhestrom: 2 A

$$I_{\text{DS}_{\text{MAX}}} = 2 \text{ A} + 1,58 \text{ A} \approx 3,6 \text{ A}$$

Der Ruhestrom wurde so hoch gewählt, damit die FETs auch beim minimalen Strom von 0,4 A noch im linearen Bereich arbeiten.

Die Mindest-Betriebsspannung ergibt sich aus der maximalen Ausgangsspannung zuzüglich des Spannungsabfalls an den FET-Bahnwiderständen im durchgesteuerten Zustand (R_{on}).

$$U_b = U_{\text{aus}_{\text{SS}}} + I_{\text{DS}_{\text{MAX}}} \cdot R_{\text{DS}_{\text{on}}} \approx 18,7 \text{ V}$$

Die Betriebsspannung wird mit $\pm 20 \text{ V}$ gewählt.

Aus der Betriebsspannung und dem Ruhestrom läßt sich nun die maximale Verlustleistung berechnen.

$$P_{\text{V}_{\text{MAX}}} = 2 \times 20 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 80 \text{ W}$$

Dies erscheint zwar als recht viel, ist jedoch bei einer (echten) Klasse-A-Endstufe unvermeidlich. Außerdem verringert (!) sich die Verlustleistung bei Aussteuerung der Endstufe erheblich, was ja der Normalfall ist.

Die letzten noch nicht beschriebenen Schaltungssteile sind das Eingangsfilter und der Rückkopplungszweig. Das Eingangsfilter aus R3,4,5 und C2,3 ist ein Bandpaß mit einer Bandbreite von 5 Hz bis 60 kHz. Damit wird die Bandbreite der Gesamtschaltung sowohl nach oben als auch nach unten nur von passiven Bauelementen begrenzt.

Dies ist nötig, um eine Bandbegrenzung durch den (aktiven) Hochpaß des Gegenkopplungs-Netzwerkes, bestehend aus R1,2 und C2, zu vermeiden. Eine solche Bandbegrenzung im Gegenkopplungs-Netzwerk ist immer problematisch und führt leicht zu Instabilitäten.

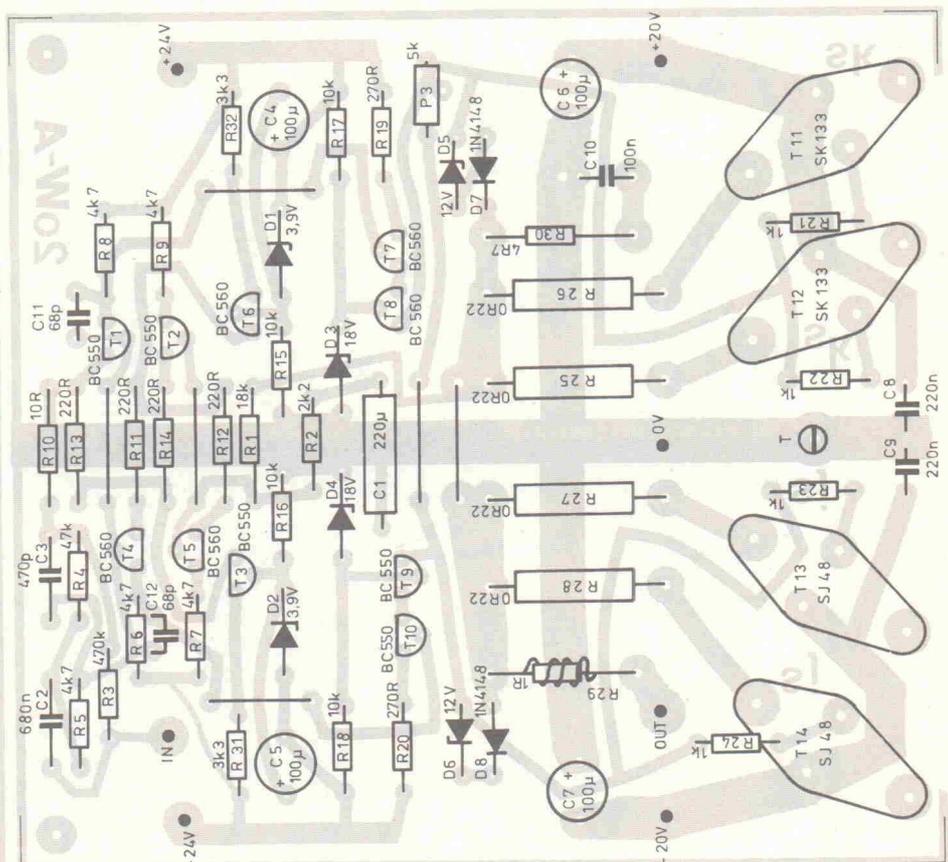
Die obere Grenzfrequenz des passiven Eingangsfilters liegt mit 60 kHz deutlich unter den Grenzfrequenzen

der aktiven Stufen, wodurch die gefürchteten TIM-Verzerrungen ausgeschlossen werden.

Das gesamte Eingangsfilter liegt nicht direkt, sondern über den niederohmigen R10 an Masse, was die Gefahr von Masseschleifen und Brummen verringert.

Das Gegenkopplungs-Netzwerk bestimmt, wie bereits beschrieben, bei ausreichend hoher Leerlaufverstärkung allein die Gesamtverstärkung. Mit den angegebenen Widerständen wird sie auf etwa 13fach eingestellt, sie ist jedoch bei Bedarf leicht durch entsprechenden Widerstandsaustausch zu ändern, z. B. zur Änderung der Eingangsempfindlichkeit.

In diesem Zweig sorgt der Kondensator C1 für zunehmende Gegenkopplung bei niedrigen Frequenzen und theoretisch für unendliche Gegenkopplung bei Gleichspannungen — also Verstärkung Null. Dadurch liegt der Ausgang auf dem gleichen Spannungspotential wie der Eingang, nämlich auf Massepotential.



Der Bestückungsplan für den 20W-A-Verstärker

Literaturhinweise:

U. Tietze, Ch. Schenk: Halbleiterschaltungstechnik, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1980.

Dimensionierung von Halbleiterschaltungen, Hrsg. v. H. Sarkowski, 3. Auflage, VDE-Verlag, Berlin 1974.

Valvo Handbuch, Ausg. 79/80, Transistoren für Verstärkeranwendungen, Boysen & Maasch, Hamburg 1979.
The Power MOSFET Data Book, Hitachi, o. O., o. J.
Power MOSFETs: Technologie und Schaltungstechnik, elrad 7/82, Heise, Hannover.

Bauanleitung: 20 W A-Endstufe

Stückliste

Widerstände 5 %, 1/4 W

R1	18k
R2	2k2
R3	470k
R4	47k
R5,6,7,8,9	4k7
R10	10R
R11,12,13,14	220R
R15,16,17,18	10k
R19,20	270R
R21,22,23,24	1k
R25,26,27,28	0R22 5 W
R29	1R 1 W
R30	4R7 1 W
R31,32	3k3
P3	5k 10-Gang-Trimmer

Halbleiter

D1,2	ZPD 3,9 V
D3,4	ZPD 18 V

D5,6	ZPD 12 V
D7,8	1N4148
T1,2,3	BC 550
T4,5,6	BC 560
T7,8	BC 560
T9,10	BC 550
T11,12	2 SK 133
T13,14	2 SJ 48

Kondensatoren

C1	220 μ F Elko, bipolar, 12 V
C2	0,68 μ F
C3	470p
C4,5,6,7	100 μ F Elko, stehend, 25 V
C8,9	220 nF, ker.
C10	100n
C11,12	68p

Verschiedenes

L1	12—15 Wdg. CuL- Draht, 1 mm Durch-
----	---------------------------------------

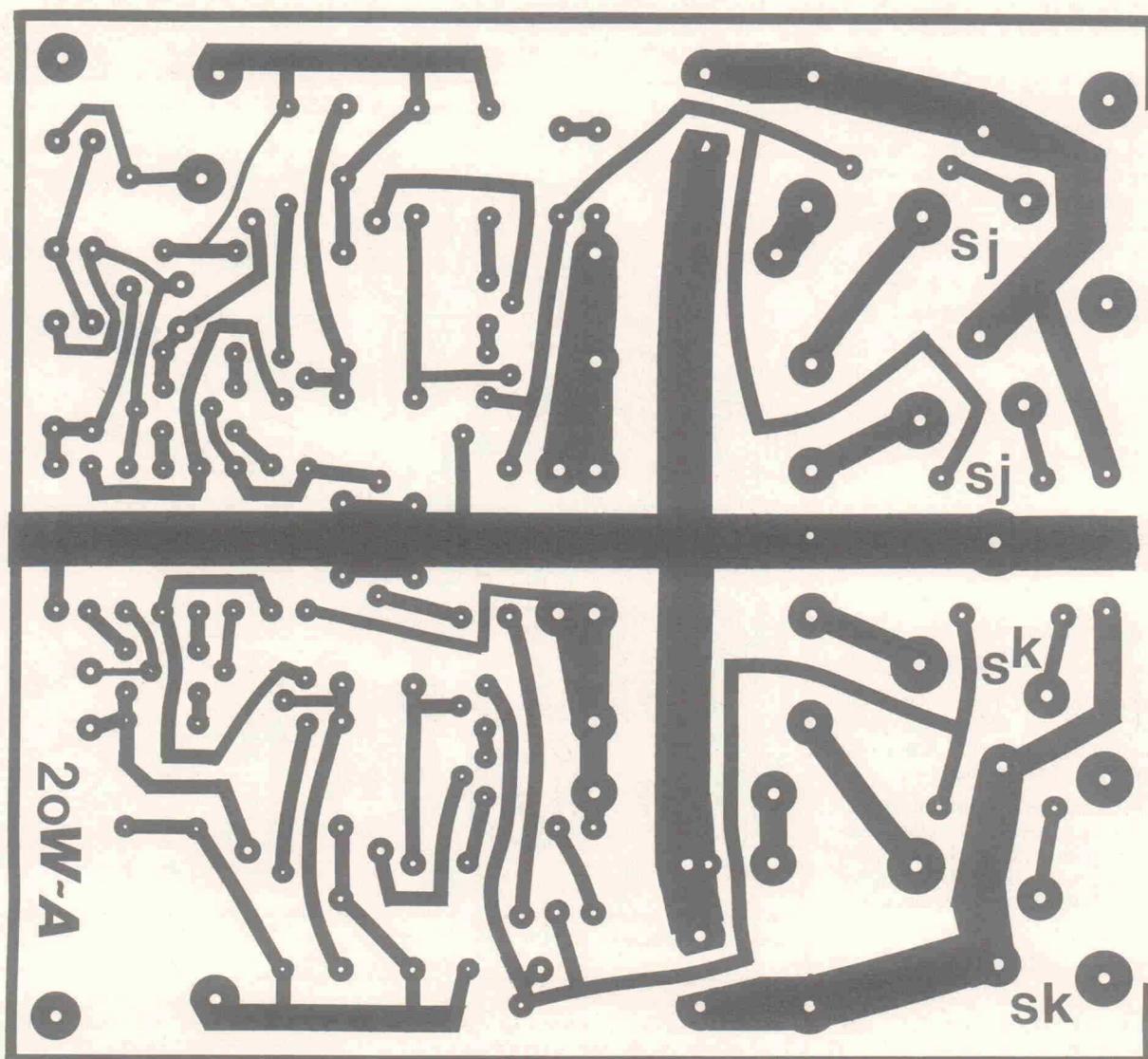
messer, auf R29 ge-
wickelt = 2 μ H

Platine

Kühlkörper	thermischer Wider- stand kleiner als 0,4 K/W, z. B. SK 91 oder SK 56, jeweils 150 mm lang
Kühlwinkel	siehe Bohrplan, 4 mm dick

Netzteil

Transformator	2 x 15 V, mindestens 3,6 A je Kanal
Gleichrichter	10 A Brücken- gleichrichter, Metallausführung
Siebelkos	2 x 20000 μ F, 25 V
Sicherungshalter, Sicherungen, Netz- schalter	
Steckernetzteil	\pm 24 V/50 mA



Das Platinen-Layout für den 20W-A-Verstärker