

Ing. (grad.) Ulrich Oberhaus

HiFi-Stereo-Endverstärker

Waren Verstärker hoher Ausgangsleistungen und guter technischer Daten früher fast ausschließlich der professionellen Studio- und Diskothekentechnik zugehört, so dokumentieren Herstellerangebote die Tendenz der wachsenden privaten Nachfrage. Dieser Bericht beschreibt die Schaltung eines solchen Verstärkers.

Bei der Entwicklung eines Hochleistungsverstärkers sind umfassende Forderungen zu berücksichtigen, wie z. B. klangliche Aspekte, hohe Ausgangsleistung bei gleichzeitiger Stabilität aller im praktischen Betrieb vorkommenden Lautsprecherlasten einschließlich des Betriebs elektrostatischer Lautsprecher, Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb auch unter erschwerten Bedingungen oder daß Phasenwinkel der angeschlossenen Last von $\pm 60^\circ$ auch bei voller Ausgangsleistung keinen Einfluß auf die Stabilität und die Qualität des Signals haben dürfen.

Der Verfasser entwickelte bei Klein + Hummel den Endverstärker SA 600 (Bild 1), der unter allen in der Praxis vorkommenden Einsatzbedingungen über gute technische Daten verfügt. Er ist nach dem Prinzip der parallelen Symmetrie aufgebaut, d. h. jede Nf-Signalhalbwellen hat ihren eigenen Verstärker.

Verstärker mit Dreifach-Darlington

Der Verstärker ist dreistufig aufgebaut, jede Stufe symmetrisch ausgelegt und in sich gegengekoppelt (Bild 2). Um eine Ausgangsleistung von 200 W an 4Ω zu erreichen und die erforderliche Reserve für 2- Ω -Betrieb bereitzustellen, werden zur Verarbeitung der positiven und negativen Halbwellen des Signals je vier Transistoren parallel geschaltet (T 23...T30). Zur Verwendung kommen Ring-Emitter-Transistoren (RET), die sich durch hohe Grenzfrequenz, hohe Stromverstärkung und linearen Verlauf der Stromverstärkung bis zu hohen Strömen auszeichnen.

Die maximal zulässige Verlustleistung der Ausgangsstufen beträgt pro Kanal 1000 W. Eine Schaltung zur Begrenzung der Verlustleistung und zur Kurzschluß-Sicherung sorgt dafür, daß die Leistungstransistoren stets im sicheren Kennlinien-Bereich arbeiten.

Die Leistungsstufe ist als Dreifach-Darlington (T19...T30) aufgebaut. Die ersten Stufen des Darlingtons (T19...T22) arbeiten im A-Betrieb mit niedrigen Emitterwiderständen. Der Ruhestrom von T21 und T22 ist so hoch, daß diese Stufe auch bei Vollaussteuerung an 4Ω noch im A-Betrieb bleibt. Das niedrige Impedanzniveau ermöglicht eine Grenzfrequenz der Leistungsstufe von über 500 kHz. Der Innenwiderstand der Leistungsstufe beträgt bereits ohne Gegenkopplung nur $0,16 \Omega$ und wird hauptsächlich durch

die Emitterwiderstände bestimmt. T19 und T20 sind Videotransistoren mit hoher Grenzfrequenz und niedriger Kapazität von etwa 3 pF. Die Belastung der Treiberstufe ändert sich dadurch auch bei hohen Frequenzen nur unwesentlich.

Als Schutz bei Übersteuerung mit hohen Frequenzen dient eine Begrenzerschaltung mit D7...D14 und R38...R39, wobei die Eingangsspannung der Darlingtonstufe stets unterhalb der durch die Diodenkette festgelegten Schwelle bleibt.

Eine Sättigung der Ausgangstransistoren wird damit verhindert. Selbst bei starken Übersteuerungen wird eine Erholzeit von maximal 3 μ s nicht überschritten.

Treiber mit symmetrischer Konzeption

Neben der Leistungsstufe ist die Treiberstufe ausschlaggebend für Linearität und Eigenschaften des Verstärkers bei hohen Frequenzen. Hier machen sich die Vorteile des symmetrischen Konzeptes am deutlichsten bemerkbar. Die Schaltung in Bild 3 ist eine konventionelle unsymmetrisch angesteuerte Treiberstufe im A-Betrieb mit einer Konstantstromquelle, während die Schaltung in Bild 4 symmetrisch angesteuert wird. R_x ist klein gegenüber dem Innenwiderstand der Konstantstromquelle und bestimmt in beiden Fällen den Quellwiderstand für T3 und T4.

Die Verstärkung der unsymmetrischen Schaltung ist näherungsweise $V_u \approx \frac{R_x}{R_E}$, wobei nur T2 als aktives Element dient. Bei der symmetrischen Schaltung arbeiten T1 und T2 im Gegentakt, das bedeutet bei gleicher Eingangsspannung wie in Bild 3 doppelte



Bild 1. Der Stereo-Leistungsverstärker SA 600 von Klein + Hummel mit 2×450 W Musikleistung an 2Ω

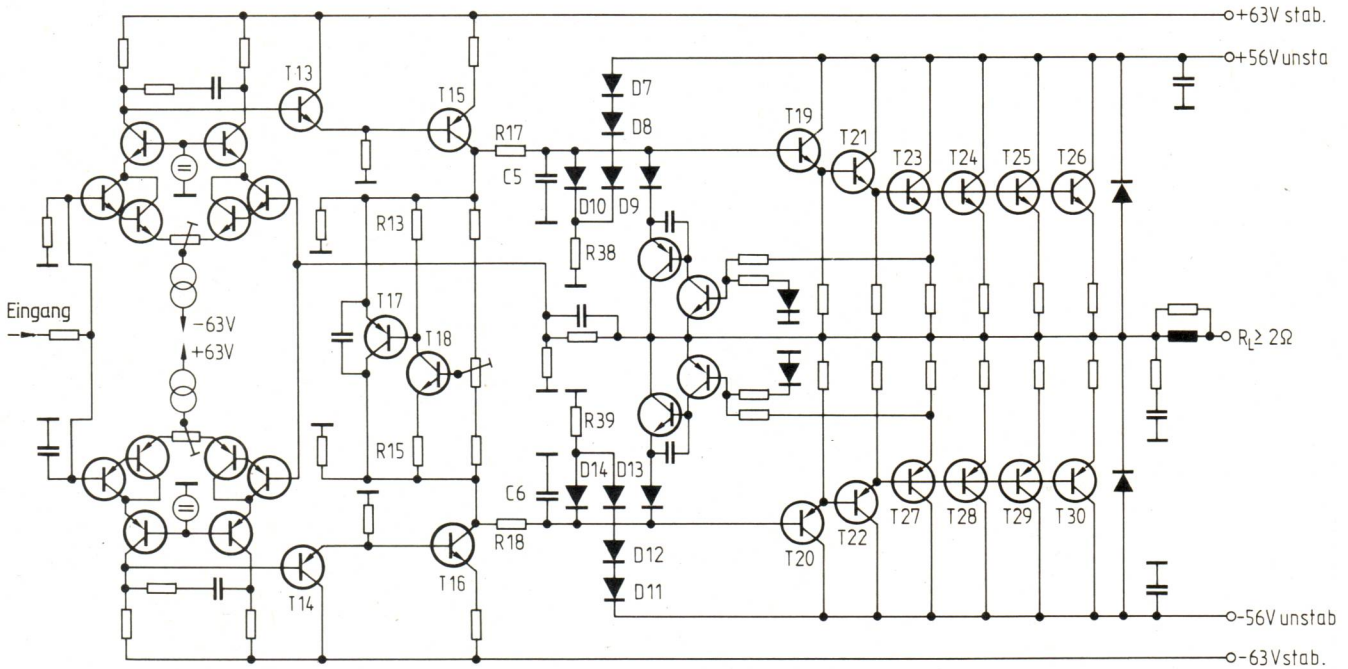
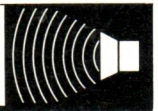


Bild 2. Vereinfachtes Schaltbild eines Kanals des Verstärkers mit dreifacher Darlington-Endstufe

Ausgangsspannung, also doppelte Verstärkung. Da die Grenzfrequenz gleichbleibt, verdoppelt sich das Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt. Die Nichtlinearitäten der Transistoren T1 und T2 heben sich zum Teil gegenseitig auf, wobei die gradzahligen Harmonischen des Ausgangssignals in dieser Schaltungsanordnung um etwa 10...15 dB zurückgehen.

T15 und T16 in Bild 2 sind Videotransistoren mit hoher Grenzfrequenz und Sperrspannung. Sie wurden speziell auf das Kriterium gradliniger Ausgangskennlinien bei hohen U_{CE} -Spannungen ausgewählt. Da die Treiberstufe durch die Darlington-Anordnung der Leistungsstufe nur mit der 10^{-4} -fachen Ausgangsleistung belastet wird, ist sichergestellt, daß die Verzerrungen der Treiberstufe auch bei hohen Aussteuerungen kaum ansteigen. Die Spannungsverstärkung der Treiberstufe beträgt etwa 40 dB. Ein Teil der

Gegenkopplungskompensation ist am Ausgang der Treiberstufe angeschlossen (R17 und R18 und C5 und C6). Wegen der geringen Stromverstärkung der Videotransistoren (T15 und T16) muß ein Impedanzwandler (T13 und T14) zur Entlastung des ansteuernden Differenzverstärkers zwischengeschaltet werden. Der Emittor ist auf Masse bezogen, um in dieser Stufe einen Transistor mit niedriger U_{CEmax} benutzen zu können. Da T15 und T16 niederohmig angesteuert werden, verbessert sich das Rauschverhalten dieser Stufe.

Die Eingangsstufe besteht aus symmetrisch aufgebauten Kaskoden-Differenzverstärkern. Neben den guten Hochfrequenzeigenschaften wird der Aufbau als Kaskodenstufe ausgenutzt, um auch in der Eingangsstufe Transistoren mit niedriger U_{CEmax} einsetzen zu können. Der eingestellte Strom beträgt je Zweig des Differenzverstärkers 1,6 mA. Bei Arbeitswiderständen von 3,3 k Ω ergibt dies einen Aussteuerbereich von etwa 10,5 V. Im Vollaussteuerungsfall beträgt der Spitzenspannungshub am Ausgang des Differenzverstärkers 0,8 V. Damit ist eine hohe Sicherheit gegen hochfrequente Übersteuerung gewährleistet. Dies trägt unter anderem dazu bei, daß der Verstärker TIM-frei arbeitet. Zusätzlich wird die obere Grenzfrequenz der Endstufe durch ein Eingangsfilter auf 200 kHz begrenzt. Am Ausgang des Differenzverstärkers ist ein Teil der Gegenkopplungskompensation angeschlossen.

Der gesamte Verstärker ist intern DC-gekoppelt. Sein Frequenzgang (ohne Gegenkopplung) reicht unter Einbeziehung der Kompensationsmaßnahmen

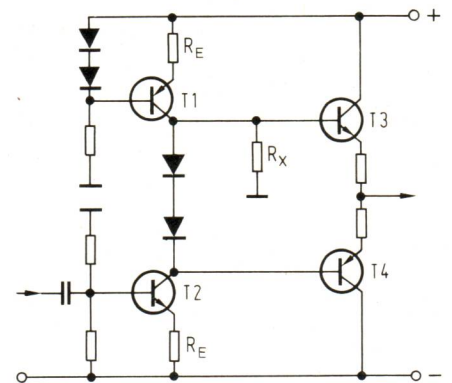


Bild 3. Konventionelle unsymmetrisch angesteuerte Treiberstufe in A-Betrieb

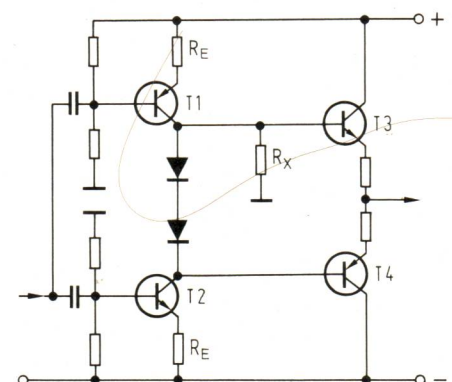
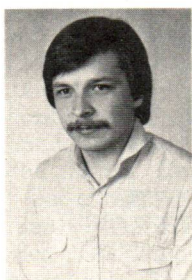
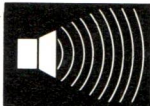


Bild 4. Symmetrische Ansteuerung der Treiberstufe im SA 600



Ing. (grad.) Ulrich Oberhaus (28) schloß eine Lehre als Elektroniker bei Nixdorf ab. Anschließend studierte er Nachrichtentechnik an der FH Lippe/Lemgo. Seit 1979 ist er bei Klein + Hummel in der Entwicklung tätig.



von DC bis 35 kHz. Die untere Grenzfrequenz wird durch den Eingangskoppelkondensator auf 7 Hz festgelegt, um unerwünschte Gleichspannung, z. B. durch einen unkorrekt arbeitenden Vorverstärker, von den Lautsprechern fernzuhalten.

Für niedrige k_3 -Verzerrungen bei hohen Frequenzen ist eine genaue Kontrolle des Endstufenruhestromes erforderlich. Sie erfolgt nach dem Prinzip der „thermischen Gegenkopplung“. T18 in Bild 2 arbeitet als „variable Zenerdiode“ und ist in thermischem Kontakt mit den Endtransistoren. T17 hat die Funktion des Stellglieds. Die Verstärkung bestimmt die Werte der Widerstände R15 und R13. Auf diese Weise wird innerhalb des Arbeitstemperaturbereiches der Endstufe ein „Ruhestromtracking“ innerhalb 15 % vom Sollwert erzielt.

Zur Erreichung der gewünschten hohen Fremdspannungsabstände wird im allgemeinen die hohe Gegenkopplung herangezogen. Da im Konzept des SA 600 nur eine Gegenkopplung von 35 dB vorhanden ist, muß die Verbesserung des Fremdspannungsabstandes durch Optimierung der einzelnen Stufen sowie eine Stabilisierung der Treiberstufen-Versorgungsspannung erfolgen. Durch die Stabilisierung wird zudem verhindert, daß bei Aussteuerung des Verstärkers mit angeschlossener Last das Ausgangssignal von Brummkomponenten moduliert wird. Als Spannungsregler werden ICs eingesetzt.

Netzteil mit 80 mF

Schaltnetzteile sind für den geforderten Leistungsbedarf dieses Geräts zu aufwendig. Die Wahl fiel auf eine konventionelle Ausführung mit zwei Ringkerntransformatoren zu je 500 VA (Bild 5). Zur Gleichrichtung werden vier Brückengleichrichter eingesetzt. Die Ladekapazität beträgt insgesamt 80 000 μF .

Im Ersatzschaltbild liegt der Innenwiderstand des Netzteiles in Reihe zum Lastwiderstand und muß daher niedrig gehalten werden, damit sich auch bei tiefen Frequenzen der Innenwiderstand und die Aussteuerbarkeit der Endstufe nicht ändern.

Zusammen mit dem getrennten Aufbau der Endstufe ermöglicht die stabilisierte Versorgungsspannung der Treiberstufen eine Übersprechdämpfung zwischen den Kanälen von mehr als 80 dB im Frequenzbereich 20 Hz bis 20 kHz.

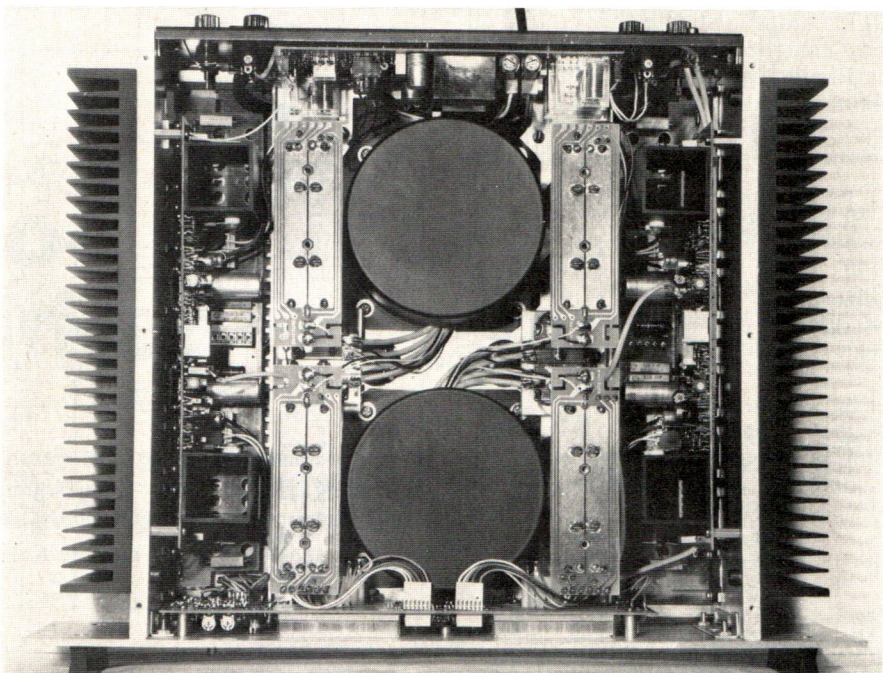


Bild 5. Blick in das Innere des Leistungsverstärkers mit den zwei großen Ringkerntransformatoren, die für je 500 VA ausgelegt sind

Dreifach-Schutzschaltung

Ringkerntransformatoren können Einschaltströme bis zum 100fachen Wert des Nennstromes haben. Um eine Auslösung der Netzsicherung zu vermeiden, werden die Trafos über Vorwiderstände eingeschaltet, die 300 ms nach dem Einschalten durch ein Relais überbrückt werden. Neben der Verlustleistung der Endstufe werden Kühlkörper- und Trafotemperatur sowie die Gleichspannungspegel an den Ausgängen der Endstufe kontrolliert. Bei Kühlkörpertemperaturen von $\geq 75^\circ\text{C}$ und Trafotemperaturen von $\geq 95^\circ\text{C}$ wird die Last über Relais vom Verstärker getrennt, wie auch beim Auftreten von mehr als $\pm 2\text{V}$ Gleichspannung am Ausgang der Endstufen.

Die Ausgangssignale beider Kanäle werden über R1 und R2 in Bild 6 dem DC-Detektor zugeführt und die Wechselspannungsanteile von C1 und C2 kurzgeschlossen.

Positive Gleichspannung gelangt über D2 und D4 an die Basis von T1, negative Gleichspannung über D1 und D3 an die Basis von T2. Das Kollektorpotential von T2 liegt im Normalfall auf -14V . Bei negativer Gleichspannung am Eingang der Schaltung steigt das Kollektorpotential von T2 auf $-7,5\text{V}$, bei positiver Gleichspannung auf $+1\text{V}$. Die Schaltung reagiert bei Gleichspannungen von mehr als $\pm 2\text{V}$ an den Lautsprecherklemmen. Das

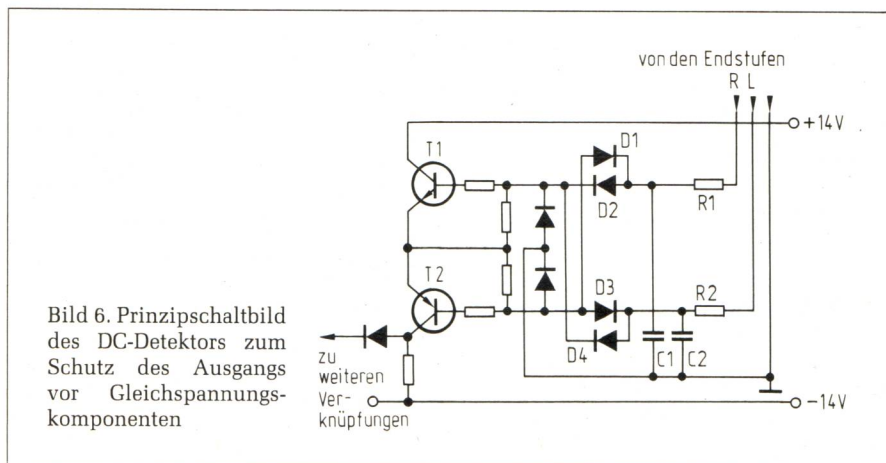
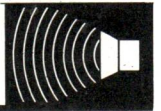


Bild 6. Prinzipschaltbild des DC-Detektors zum Schutz des Ausgangs vor Gleichspannungskomponenten



sprechen der Clippenanzeige beträgt etwa 1 dB.

Auf der Eingangsseite stehen außer Cinch- und DIN-Buchsen zwei Anschlüsse für Cannon-Stecker zur Verfügung. Über die 7polige DIN-Buchse kann in Verbindung mit dem Vorverstärker SV 2006 von K + H die Ferneinschaltung der Endstufe erfolgen. Für den Lautsprecheranschluß stehen stabile Polklemmen zur Verfügung. Weitere technische Daten sind in der Tabelle enthalten.

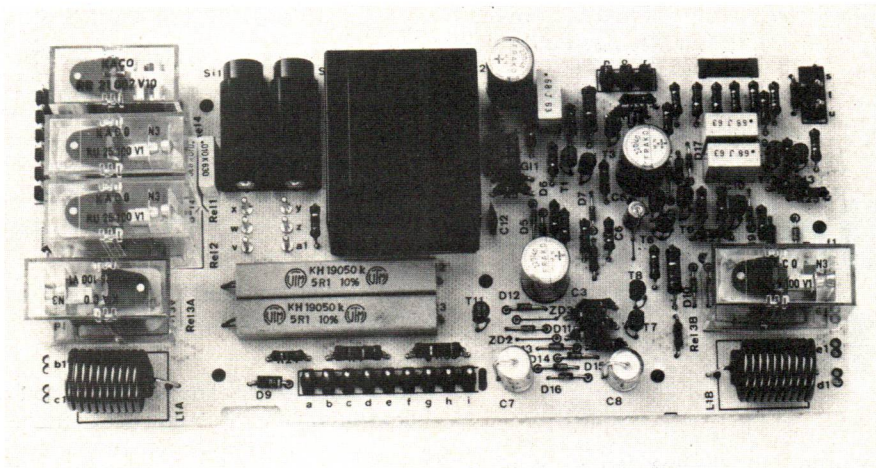


Bild 7. Platinenaufbau der dreifachen Schutzschaltung für Kühlkörpertemperatur, Transformatortemperatur und Gleichspannung am Endstufenausgang

Ausgangssignal wird in einer Logikschaltung ausgewertet.

Ein Verlustleistungsbegrenzer mit Kurzschlußsicherung überwacht die Leistungsstufe und verhindert einen Ausfall bei Kurzschluß der Lautsprecherausgänge. Die Sicherung ist als Brückenschaltung aufgebaut, wobei Lastwiderstand und Emitterwiderstände der Leistungstransistoren einen Zweig der Brücke bilden. Kommt diese durch Überlastung oder Kurzschluß aus dem Gleichgewicht, wird der Ausgangsstrom auf 8 A begrenzt, bis die Temperaturüberwachung die Last abschaltet. Die Ansprechzeitkonstante der Strombegrenzung ist so gewählt, daß kurzzeitige Stromspitzen ohne Begrenzung übertragen werden. Für Impulsspitzen steht selbst bei Abschluß der Endstufe unterhalb der Nennimpedanz die volle Ausgangsleistung zur Verfügung. Die gewählte Dimensionierung erlaubt an Lastwiderständen von 2 Ω noch etwa 400 W und an Lastimpedanzen $4 \Omega \cdot e^{\pm j60^\circ}$ noch 200 W Ausgangsleistung. Den Platinenaufbau zeigt Bild 7.

Anzeigeeinrichtungen und Anschlußmöglichkeiten

Anzeigeeinrichtungen und Pegelsteller befinden sich zusammen mit dem Einschalter auf einer gemeinsamen Platine. Zur ständigen Überwachung des Ausgangspegels dient ein Meßwerk mit Spitzenwertcharakteristik. Die Anzeigegenauigkeit beträgt $\pm 0,5$ dB. Vier auf der Frontplatte angebrachte LEDs signalisieren den Betriebszustand des Verstärkers. Während der Einschaltphase und im Störfall blinkt die Betriebsanzeige. Bei Überschreitung der zulässigen Betriebstemperatur leuchtet zusätzlich der Übertemperaturindikator. Eine eventuelle Übersteuerung (Clippen)

wird von einer weiteren LED angezeigt, die auch bei kurzen Impulsen mindestens 300 ms lang aufleuchtet. Die Aussteuerungsreserve beim An-

Stichworte zum Inhalt

Prinzip der parallelen Symmetrie, Darlington, Kaskoden-Differenzverstärker, Konstantstromquelle, TIM, Gegenkopplungskompensation, k_3 -Verzerrungen, thermische Gegenkopplung, Schutzschaltung.

Tabelle: Technische Daten des SA 600

Ausgangsleistung Sinus-Dauerton	2 x 200 W an 4 Ω (28,3 V) 2 x 125 W an 8 Ω (31,6 V) 2 x 300 W an 2 Ω (24,4 V)
Musikleistung	2 x 340 W an 4 Ω (37 V) 2 x 170 W an 8 Ω (37 V) 2 x 450 W an 2 Ω (30 V)
Ausgangsstrom	28 A max., kurzzeitig
Frequenzgang (über Eingangsfilter und Ausgangs-Netzwerk)	7 Hz...200 kHz (-3 dB) 20 Hz...50 kHz (-0,3 dB)
Leistungsbandbreite	1 Hz...350 kHz
Slew Rate	> 70 V/μs
Dämpfungsfaktor	100 an 4 Ω (20 Hz...20 kHz)
Anstiegszeit	< 1 μs (200 W an 4 Ω)
Erholzeit	3 μs bei 10 dB Übersteuerung
Geräuschspannungsabstand Intermodulation	120 dB (A) < 0,007 % (200 W an 4 Ω, 60/7000 Hz, 4:1)
Klirrfaktor	0,003 % (200 W, 4 Ω, 1 kHz) 0,003 % (50 mW, 4 Ω, 20 Hz...10 kHz) 0,008 % (200 W, 4 Ω, 10 Hz...20 kHz) 0,08 % (200 W, 4 Ω, 10 Hz...100 kHz)
Eingangs-Empfindlichkeit	1 V für 200 W an 4 Ω
Eingangs-Widerstand	10 kΩ
Übersprechdämpfung	> 80 dB (10 Hz...20 kHz)
Zulässige Lastimpedanz	größer als $1,5 \Omega$ oder $4 \Omega \times e^{\pm j60^\circ}$ (z. B. 4 Ω parallel zu 6,9 μF bei 10 kHz)
Leistungsaufnahme	80 VA ohne Signal 800 VA bei Nennleistung
Abmessungen	483 mm x 132 mm x 360 mm
Masse	22 kg
Anmerkung:	Vorstehende Daten sind auf die angewandte Gegenkopplung von 35 dB bezogen. Schon ohne diese Gegenkopplung ist bei 200 W / 4 Ω / 10 kHz der Klirrgrad $\leq 0,07$ %.