

DIGITAL-AUDIOVERSTÄRKER CLASS D



Der hier vorgestellte Audio-Endverstärker kann sowohl in Stereobetrieb mit 2 x 75 W Sinus als auch mit einem Monosignal in Brückenbetrieb arbeiten und liefert dann 150 W an 8 Ω. Durch digitale Verstärkertechnologie (Class D) hat der Verstärker einen äußerst hohen Wirkungsgrad bis zu 90 % und gute Klangeigenschaften.

Allgemeines

Im Audiobereich gehören NF-Leistungsverstärker zu den wichtigsten Baugruppen. Gute Klangeigenschaften, eine hohe Ausgangsleistung und ein hoher Wirkungsgrad sind die wichtigsten Anforderungen, die an eine Audio-Endstufe gestellt werden.

Verschiedene Verstärker-Technologien bieten Vor- und Nachteile, wobei ein guter Kompromiss zwischen allen Forderungen meistens die beste Lösung ist. Während vor einigen Jahren Digitalverstärker in Class-D-Betrieb wesentlich schlechtere Klangeigenschaften aufwiesen als konventionelle Verstärker in A/B-Betrieb, hat sich das durch den Einsatz von neuen, modernen Komponenten geändert. Die nachteiligen Eigenschaften wurden verbessert, so dass die Vorteile jetzt bei vielen Anwendungen überwiegen.

Verstärker in Klasse-A/B-Betrieb

Nach wie vor arbeiten die meisten Audioverstärker im A/B-Betrieb. Diese Betriebsart ermöglicht sehr gute Klangeigenschaften bei sehr geringer Ruhestromaufnahme. Dieser Verstärkertyp ist üblicherweise als Gegentakt-Endstufe mit symmetrischer Betriebsspannung aufgebaut. Eine gleichstrommäßige Reihenschaltung der

Endstufen-Transistoren macht den Einsatz von Übertragern überflüssig und ermöglicht somit auch eine recht kostengünstige Realisierung.

Der Nachteil dieser traditionellen Verstärkertechnologie ist die geringe Effizienz. Abhängig von der Lastimpedanz und der aktuell geforderten Ausgangsleistung im Verhältnis zur Maximalleistung des Verstärkers beträgt der maximal erreichbare Wirkungsgrad nicht mehr als 60 bis 70 %. Unter Hörbedingungen in der Praxis bei 30 % Voll-Last stellt sich dann gerade mal

ein Wirkungsgrad um die 35 % ein. Im Vergleich zu Verstärkern im A-Betrieb, die theoretisch eine maximale Effizienz von 25 % erreichen, allerdings schon ein guter Wert.

Zwangsläufig entsteht bei einem geringen Wirkungsgrad auch eine entsprechend hohe Verlustleistung, die in Form von Verlustwärme verloren geht. Ein wesentlicher Teil der zugeführten Energie muss somit an großzügig dimensionierten Kühlkörpern regelrecht „verbraten“ werden. Große Kühlkörper haben natürlich auch einen entsprechenden Platzbedarf, sind teuer und stellen

Technische Daten: Digital-Audioverstärker DA 150

Ausgangsleistung:	150 W an 8 Ω, Mono-Brücke (10 % TDH +N) 100 W an 8 Ω, Mono-Brücke (0,5 % TDH+N) 75 W an 4 Ω, Stereo, Single-ended (10 % TDH+N)
Wirkungsgrad (Endstufen):	94 % bei $P_o = 30 \text{ W}$, $f_i = 1 \text{ kHz}$
Klirrfaktor + Rauschen:	0,05 % ($P_o = 1 \text{ W}$, $f_i = 1 \text{ kHz}$) 0,5 % (100 W an 8 Ω, Mono-Brücke) 0,5% (60 W an 4 Ω, Stereo, Single-ended)
Spannungsversorgung:	Eingebautes 230-V-Netzteil
Audio-Eingang:	2 x Cinch-Buchse
Lautsprecher-Anschlüsse:	Standard-Lautsprecher-Klemmleisten
Bedienelemente:	Netzschalter, Stereo-Lautstärkepoti, Umschalter Stereo/Mono Brücke an der Geräterückseite
Anzeigen:	Netz-Kontroll-LED
Abmessungen (B x H x T):	305 x 97 x 155 mm

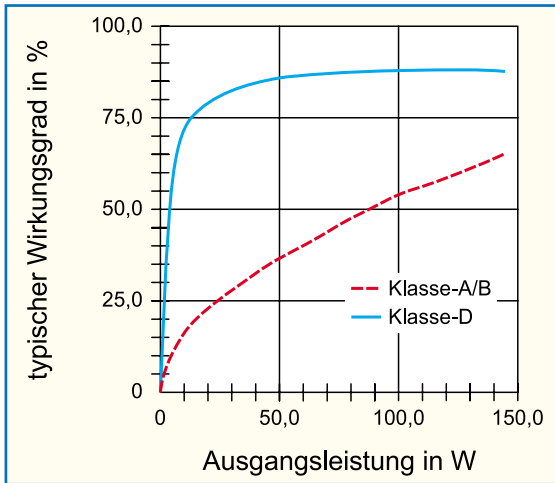


Bild 1: Der Wirkungsgrad von Klasse A/B und Klasse D im Vergleich

trieb und setzen Leistung in Verlustwärme um.

Je steiler nun die Schaltflanken, desto geringer ist die Verlustleistung in der Endstufe.

Steile Schaltflanken haben allerdings den Nachteil, hochfrequente Störungen zu erzeugen,

bezüglich der Luftkonvektion Anforderungen an die mechanische Konstruktion.

Nicht zuletzt ist zu bedenken, dass entsprechende Netzteile zum Betrieb der Endstufen erforderlich sind, die auch die als Verlustwärme abgeführte Leistung zusätzlich zur Ausgangsleistung zur Verfügung stellen müssen.

Dazu ein Beispiel:

Wir nehmen an, unser Verstärker hat eine Sinus-Dauerleistung von 100 W und einen Wirkungsgrad von 65 % bei Voll-Last (durchaus ein guter Wert). Da die 100 W somit 65 % der Leistung sind, die das Netzteil liefern muss, werden am Verstärkereingang ca. 154 W benötigt. Natürlich hat das Netzteil auch keinen Wirkungsgrad von 100 %. Wenn wir hier von ca. 75 % ausgehen, liegt die Netzaufnahme bei 100 W Ausgangsleistung in A/B-Betrieb bei über 200 W.

Verstärker in Class-D-Betrieb

Verstärker in Class-D-Betrieb arbeiten wie Schaltnetzteile mit Pulsweitenmodulation. Die Philosophie dieser getakteten Verstärker beruht darauf, dass die Leistungshalbleiter der Endstufe entweder vollständig durchgeschaltet oder gesperrt sind. Nur in einer sehr kurzen Phase während des Umschaltvorgangs (Übergang von „high“ nach „low“ oder umgekehrt) befinden sich die Halbleiter der Endstufe im linearen Be-

trieb, so dass in der Praxis ein guter Kompromiss zwischen der Steilheit der Schaltflanken und den Störungen im Funkfeld bzw. den netzgebundenen Störungen gefunden werden muss.

Neben den Schaltverlusten sind bei getakteten Verstärkern noch die Verluste an den RDS-on-Widerständen der Endstufen-Transistoren zu berücksichtigen, die bei den modernen Komponenten relativ gering sind.

Abbildung 1 zeigt den Wirkungsgrad unseres Class-D-Verstärkers im Vergleich zu einem typischen A/B-Verstärker, und in Abbildung 2 ist die erforderliche Netzteil-Leistung im Vergleich zu sehen.

Das eingangsseitig zugeführte Audio-NF-Signal wird mit Hilfe eines PW-Modulators in ein pulsweitenmoduliertes Signal umgewandelt und zur Steuerung der Endstufe benutzt.

Aus dem PWM-Ausgangssignal wird mit Hilfe eines Ausgangsfilters (Tiefpass) das NF-Signal dann zurückgewonnen.

Für gute Klangeigenschaften sind eine hohe Schaltfrequenz und kurze Schaltzeiten bei den Endstufen-Transistoren wichtig. Unbedingt muss die Bandbreite des Eingangssignals auf 60 % der PWM-Schaltfrequenz begrenzt sein, da es sonst zu Intermodulationsstörungen kommt.

Bei unserem Verstärker beträgt die

Schaltfrequenz des Pulsweitenmodulators ca. 310 kHz und die Schaltzeiten der Endstufen-Transistoren sind mit 30 ns (Rise-Time, Fall-Time) sehr niedrig. Dadurch wird ein äußerst hoher Wirkungsgrad bis über 90 % erreicht und der Klirrfaktor ist sehr gering.

Bei der erforderlichen Kühlleistung bestehen somit gravierende Unterschiede im Vergleich zu Class-A/B-Verstärkern, wie in Abbildung 3 zu sehen ist. Der in unserem Verstärker eingesetzte Kühlkörper ist bereits großzügig dimensioniert.

Die Rekonstruktion der Audio-Informationen aus dem Ausgangssignal erfolgt mit recht einfachen Filterschaltungen, da Lautsprecher vorhandene Hochfrequenzanteile sowieso nicht verarbeiten können und selber als Filter fungieren. Natürlich müssen die HF-Anteile so weit wie möglich entfernt werden, damit die geltenden EMV-Vorschriften sicher eingehalten werden. Für Messungen am Lautsprecher-Ausgang ist es erforderlich, entsprechende Tiefpassfilter nachzuschalten, da es sonst zu Verfälschungen bei der Messung kommen kann.

Ausgangsleistung

Bei den technischen Daten eines Verstärkers ist außer den Klangeigenschaften die Ausgangsleistung eine wichtige technische Angabe. Die Aussage „Je mehr Watt, desto besser“ stimmt aber keineswegs, und es muss auch unterschieden werden, welche Leistung der Hersteller angibt.

Neben den seriösen Leistungsangaben Sinus oder RMS werden oft auch mehr oder weniger unseriöse Leistungsangaben gezielt verbreitet, einfach nur um auf hohe Wertangaben zu kommen. Verstärker mit hohen Wertangaben bei der Ausgangsleistung lassen sich an nicht fachkundige Verbraucher am einfachsten verkaufen.

Während die Sinus-, RMS- oder Nennleistung weitgehend vergleichbar sind, wird die Musikleistung mit impulsartigen Signalen gemessen, die normaler Musik nachempfunden sind. Die Angabe der Mu-

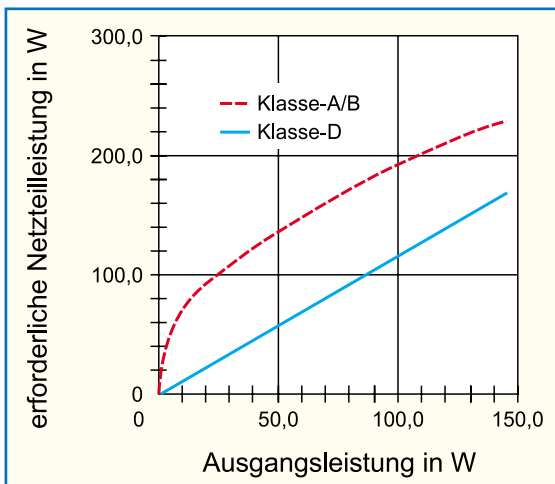
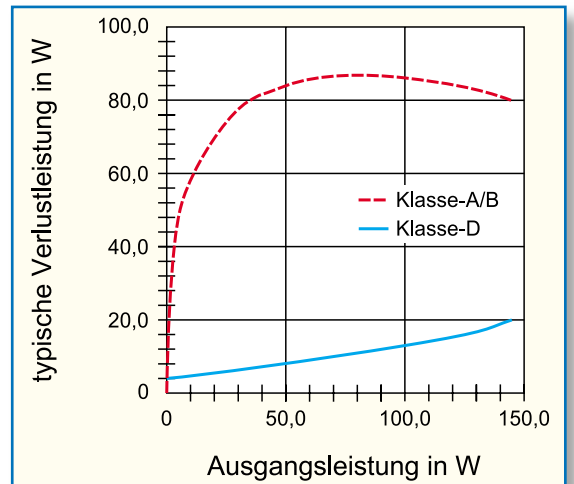


Bild 2: Erforderliche Netzteil-Leistung in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung bei Klasse A/B und Klasse D

Bild 3: Verlustleistung am Kühlkörper im Vergleich



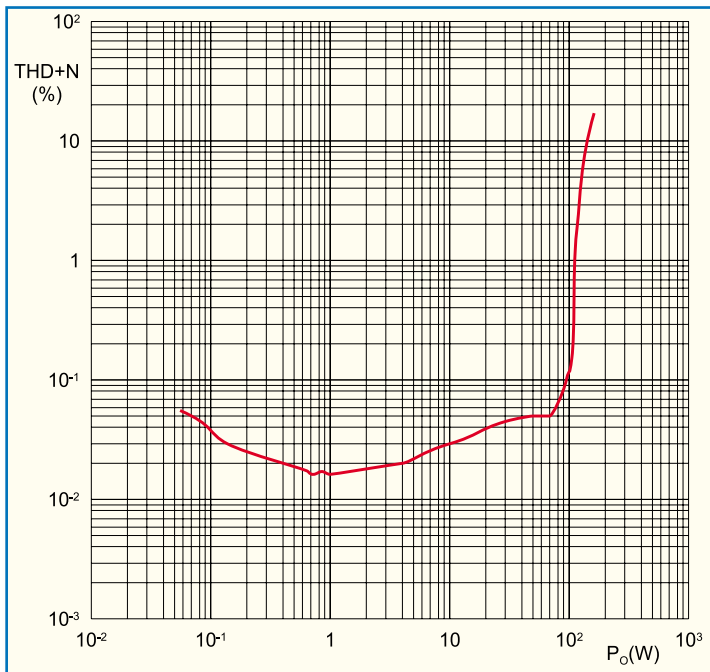


Bild 4: Nicht-lineare Verzerrungen in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung

sikleistung ist allerdings schwer nachzuprüfen. Bei der vorwiegend im Low-Cost-Bereich anzutreffenden PMPO-Leistung wird mit sehr kurzen Impulsen im μs -Bereich gemessen. Im Vergleich zu Sinus oder RMS kommt dann u. U. die 20fache Leistung heraus. Mit der Realität hat diese zur gezielten Täuschung dienende Angabe meistens nichts mehr zu tun.

Ob Leistungsangaben aus der Luft gegriffen sind, ist oft schon an der Leistungsaufnahme des Gerätes zu erkennen. Grundsätzlich kann nun mal kein Gerät mehr Leistung abgeben, als zugeführt wird. Beträgt z. B. die Leistungsaufnahme eines Gerätes max. 250 W, bleiben bei einem Gesamtwirkungsgrad von 60 % nur noch 150 W an Ausgangsleistung, die an die Lautsprecher abgegeben wird. Wenn es sich dabei beispielsweise um einem 5-Kanal-Surround-Verstärker handelt, bleiben pro Kanal nur noch 30 W maximal übrig. Es ist also leicht nachzuvollziehen, dass Leistungsangaben, die darüber weit hinausgehen, nicht der Realität entsprechen können.

Die Sinus-Ausgangsleistung unseres Verstärkers beträgt im Stereobetrieb typisch $2 \times 75 \text{ W}$ an 4Ω bzw. bei Mono-Brückenschaltung 150 W. Damit lässt sich eine beeindruckende Lautstärke erreichen, auch wenn sich die Leistungsangabe im Vergleich zu Verstärkern mit utopischen PMPO-Angaben eher bescheiden anhört. Beim Vergleich der Ausgangsleistung sollte immer die Sinus-, RMS- oder Nennleistung herangezogen werden.

Class-D-Audioverstärker DA 150

Der digitale Class-D-Verstärker DA 150

ist in einem massiven Metallgehäuse mit ansprechendem Alu-Frontprofil untergebracht, dessen Abmessungen (B x H x T) $305 \times 97 \times 155 \text{ mm}$ betragen. Im Vergleich zu traditionellen Verstärkern in A/B-Betrieb zeichnet sich der DA 150 durch einen ausgezeichneten Wirkungsgrad aus, der bei den Endstufen bis zu 90 % beträgt.

Der DA 150 kann wahlweise als Stereoverstärker mit $2 \times 75 \text{ W}$ oder im Monobetrieb mit einer Ausgangsleistung von 150 W betrieben werden. Die Umschaltung zwischen Mono- und Stereobetrieb erfolgt mit einem Schiebeschalter an der Geräterückseite. Für die Zuführung des Audio-Signals stehen an der Geräterückseite Cinch-Buchsen und für den Anschluss der Lautsprecher Standard-Lautsprecher-Klemmleisten zur Verfügung.

Im Stereobetrieb darf die minimale Lautsprecherimpedanz 4Ω und im Monobetrieb 8Ω betragen.

Die Endstufen verfügen über eine sehr schnelle integrierte Schutzschaltung, die

bei Überschreiten des maximalen Ausgangsstroms innerhalb von $1 \mu\text{s}$ anspricht. Die Lautsprecherausgänge sind somit kurzschlussfest. Dabei wird jedoch ein entsprechender Impedanzverlauf der angeschlos-

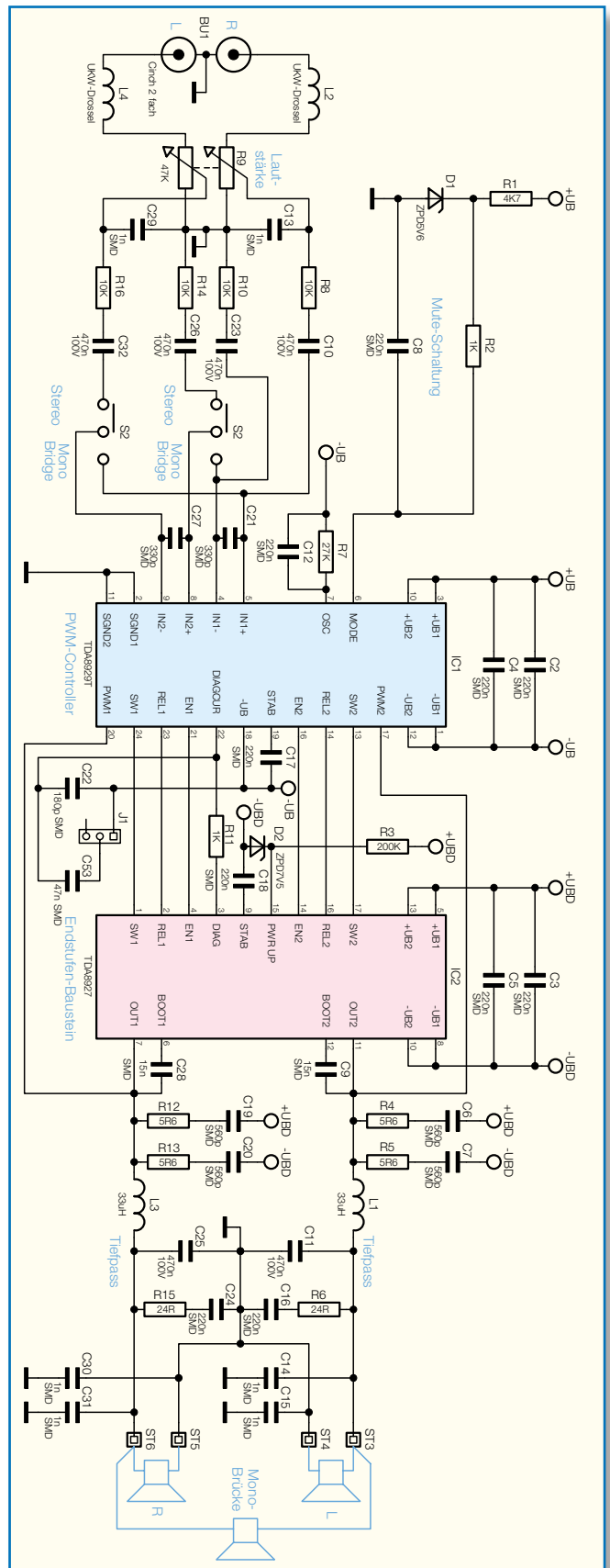


Bild 5: Hauptschaltbild des DA 150

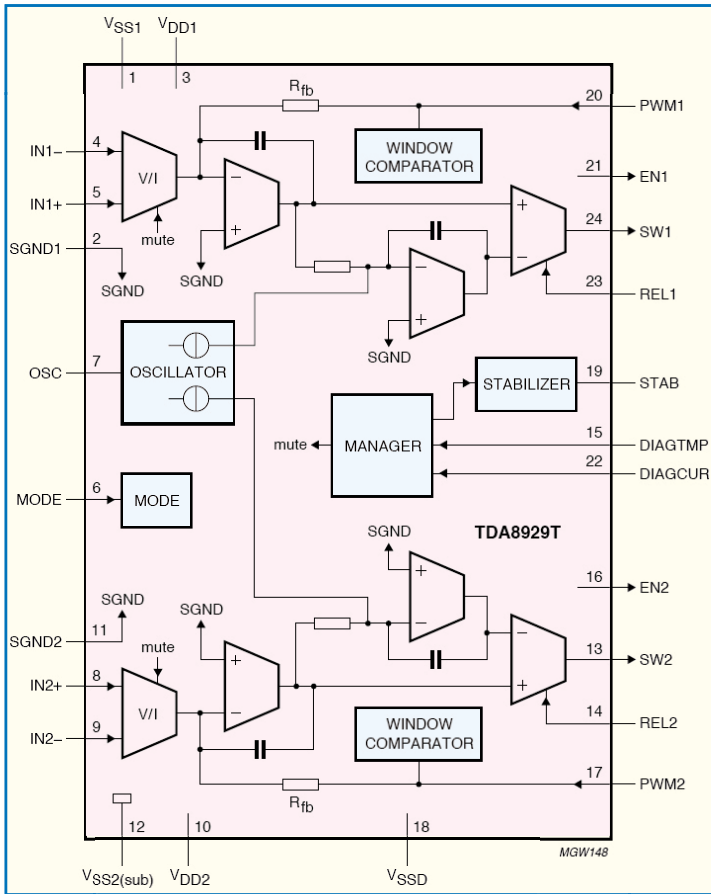


Bild 6: Interner Aufbau des PWM-Controllers TDA8929T

Kerzen sollten grundsätzlich nicht auf den Verstärker gestellt werden.

Verstärkerschaltung

Die Schaltung unseres Digital-Audioverstärkers ist in Abbildung 5 zu sehen.

Das Schaltungskonzept basiert auf einer 2-Chip-Lösung von Philips, die alle zum Aufbau des Verstärkers erforderlichen Stufen enthält. An externer Beschaltung sind neben den Ausgangsfiltern nur noch wenige externe Komponenten erforderlich.

Beim ersten IC (IC 1 im Schaltbild) handelt es sich um den so genannten Controller, dessen interner Aufbau in Abbildung 6 zu sehen ist. Dieses IC beinhaltet die analogen Eingangsstufen, einen Oszillator und die beiden PW-Modulatoren, die zur Umsetzung der analogen Audio-Informationen in pulsweitenmodulierte Signale erforderlich sind. Des Weiteren sind hier die Steuerlogik und die Verarbeitung der Schutzschaltungssignale enthalten. Die Schutzschaltung spricht grundsätzlich an bei Überstrom in einer Endstufe oder bei Übertemperatur.

Der interne Aufbau der Leistungsendstufe ist in Abbildung 7 dargestellt. Dieses IC vom Typ TDA8927J beinhaltet die Leistungstransistoren für beide Stereo-Endstufen, die zugehörigen Treiberstufen und die Steuerelektronik. An weiteren Stufen ist hier die Temperaturüberwachung mit integriertem Sensor und eine sehr schnelle Stromerfassung in den Endstufen enthalten. Über die entsprechenden Leitungen ist dieses IC direkt mit dem PWM-Controller (TDA8929T) verbunden. Doch nun zurück zum Verstärkerschaltbild in Abbildung 5.

Die Audio-Eingangssignale des rechten und linken Stereokanals werden dem Verstärker an der Stereo-Cinchbuchse BU 1 zugeführt, wobei die Eingänge jeweils für Normpegel (775 mV) ausgelegt sind. Von hier aus gelangen die Signale direkt auf die zugehörigen Anschlüsse des zur Lautstärke-Einstellung dienenden Stereo-Potentiometers R 9.

Der Widerstand des Potis von 47 kΩ bestimmt gleichzeitig den Eingangswiderstand der Schaltung. Vom Schleifer des Potis gelangt das Signal des rechten Kanals dann über R 8 und den zur galvanischen Trennung dienenden Kondensator C 10 auf den Plus-Eingang des in IC 1 integrierten Eingangsverstärkers. In gleicher Weise wird das Signal des linken Stereokanals über R 16, C 32 und über die Kontakte des Schiebeschalters S 2 zum Minus-Eingang des Eingangsverstärkers für den linken Kanal geführt. Beim rechten Kanal liegt der Minus-Eingang signalmäßig über C 23, R 10 auf Massepotential und beim linken Kanal ist der Plus-Eingang über den Umschalter S 2 und die Komponenten C 26,

senen Lautsprecherboxen vorausgesetzt. Bei Lautsprecherboxen mit schlechtem Impedanzverlauf, d. h. die 4 Ω werden deutlich unterschritten, kann es dann bei hoher Ausgangsleistung zum Ansprechen der Schutzschaltung kommen.

Mit Hilfe eines Codiersteckers auf der Leiterplatte besteht auch die Möglichkeit, die Schutzschaltung in einen langsamen Betriebsmodus umzuschalten. Dabei ist aber unbedingt zu beachten, dass die Lautspre-

cherausgänge dann bei hoher Ausgangsleistung nicht mehr kurzschlussfest sind.

Ein leistungsfähiger Netztransformator liefert die erforderliche Energie. Die Klangeigenschaften sind für einen Verstärker in Class-D-Betrieb sehr gut, wie auch anhand der nichtlinearen Verzerrungen (Klirrfaktor und Rauschen) in Abbildung 4 zu sehen ist.

Beim Betrieb des Verstärkers ist natürlich für eine ausreichende Belüftung zu sorgen und die Lüftungsöffnungen dürfen nicht zugedeckt werden. Während des Betriebs ist das Gerät auf eine ebene Fläche zu stellen, wobei sicherzustellen ist, dass eine einwandfreie Luftzuführung durch die Lüftungsöffnung im unteren Gehäusebereich möglich ist. Offene Brandquellen wie z. B. brennende

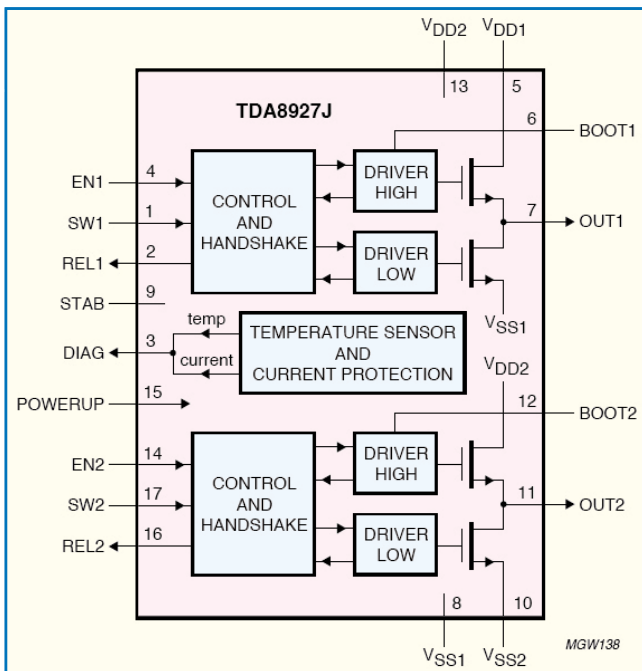


Bild 7: Integrierte Stereo-Digital-Endstufe TDA8927J

R 14 signalmäßig mit Schaltungsmasse verbunden. Der Schiebeschalter S 2 dient zur Umschaltung zwischen Stereobetrieb und Mono-Brückenschaltung. Bei Mono-Brückenbetrieb wird das NF-Eingangssignal dann an der Buchse des rechten Stereo-Kanals zugeführt. Die Kondensatoren C 21 und C 27 dienen im Zusammenhang mit den Widerständen R 8, R 10, R 14 und R 16 zur Eingangsbandbegrenzung.

Der in IC 1 integrierte Oszillator für die PWM-Signalerzeugung ist extern ausschließlich mit dem Widerstand R 7 und dem Kondensator C 12 beschaltet.

Die Beschaltung an Pin 6 (Mode) sorgt dafür, dass der Verstärker zur Einschaltgeräusch-Unterdrückung nach dem Anlegen der Betriebsspannung ca. 200 ms im Mute-Mode gehalten wird.

An Pin 3 und Pin 10 erfolgt die Versorgung des Bausteins mit der positiven Betriebsspannung und an Pin 1 und Pin 12 wird die negative Spannung zugeführt.

Die digitale Audio-Information in Form eines PWM-Signals für den rechten Kanal steht an Pin 24 und das Signal für den linken Stereokanal an Pin 13 zur Verfügung. Diese Signale werden direkt dem Endstufen-Baustein IC 2 zugeführt. Über die „Enable“-Signale erfolgt die Freigabe der Endstufen vom Steuerbaustein (Pin 16, Pin 21 von IC 1, bzw. Pin 4, Pin 14 von IC 2).

Zur Steuerung des PW-Modulators erhält IC 1 entsprechende Signale an Pin 14 und Pin 23 vom Endstufenbaustein. Des Weiteren werden die Ausgangssignale (PWM 1, PWM 2) zum Steuerbaustein zurückgekoppelt. Die in IC 2 integrierte Schutzschaltung überwacht IC 2 hinsichtlich Übertemperatur und Kurzschlüsse in den Endstufen. Sobald ein Wert außerhalb des zulässigen Bereichs liegt, erhält IC 1 ein entsprechendes Signal, wobei die mit R 1, C 22 realisierte Zeitkonstante die Ansprechzeit bestimmt. Unter normalen Betriebsbedingungen ist C 53 nicht parallel zu C 22 geschaltet und die Endstufen sind kurzschlussfest. Bei Überstrom erfolgt dann innerhalb von 1 μ s das Ansprechen der Schutzschaltung.

Wenn es bei einem ungünstigen Impedanzverlauf der angeschlossenen Lautsprecher bei hohen Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Schutzschaltung kommt, besteht die Möglichkeit, den Kondensator C 53 mit Hilfe des Codiersteckers JP 1 parallel zu C 22 zu schalten. Dadurch erfolgt dann ein wesentlich langsames Ansprechen der Schutzschaltung, wobei aber unbedingt zu beachten ist, dass die Endstufen dann nicht mehr kurzschlussfest sind. Da in diesem Fall ein Kurzschluss an den Lautsprecher-Ausgängen zur Zerstörung der entsprechenden Endstufen führen kann, sollte möglichst auf das Parallelschalten von C 53 verzichtet werden.

Der Spannungsregler zur Versorgung der internen Stufen ist extern mit dem Pufferkondensator C 18 beschaltet. Mit der an D 2 anliegenden Spannung von 7,5 V werden die internen Stufen von IC 2 freigegeben.

Während die positive Spannung zur Versorgung der Leistungsendstufen Pin 5 und Pin 13 zugeführt wird, erhält der Endstufen-Baustein die negative Spannung an Pin 8 und Pin 10.

Da an den direkten Verstärkerausgängen hochfrequente Rechtecksignale anliegen, sind zur Rekonstruktion der Audio-Signale unbedingt Ausgangsfilter erforderlich. Ohne Filterung wären natürlich auch nicht die geltenden EMV-Bestimmungen einzuhalten, da die hochfrequenten Signalanteile über die Lautsprecherleitungen abgestrahlt würden.

Das Tiefpassfilter für den rechten Kanal ist mit L 3, C 25 realisiert und L 1, C 11 bilden das Tiefpassfilter für den linken Kanal. Die weiteren Kondensatoren und Widerstände im Bereich der Lautsprecher-Ausgänge dienen zur Störunterdrückung.

ST 5 und ST 6 sind mit den Lautsprecherklemmen des rechten Kanals und ST 3, ST 4 mit den entsprechenden Klemmen des linken Stereokanals verbunden. Beim Mono-Brückenbetrieb ist der Lautsprecher an ST 3 und ST 6 anzuschließen.

Spannungsversorgung des DA 150

Die Netzteilschaltung des DA 150 ist in Abbildung 8 zu sehen. An der Netzbuchse BU 100 wird die 230-V-Netz-Wechselspannung zugeführt, die dann über die Netzsicherung SI 100 auf den zweipoligen Netzschalter S 100 gelangt. Vom Netzschalter gelangt die Spannung direkt auf die Primärwicklung des Netztransformators und den X2-Kondensator C 100 zur Störunterdrückung.

Sekundärseitig ist der Trafo mit zwei identischen Wicklungen ausgestattet, die jeweils 20 V/4 A liefern. Diese Trafowicklungen speisen die beiden mit D 3 sowie D 5 und D 6 aufgebauten Zweiweg-Gleichrichterschaltungen. Die jeweils parallel zu den Dioden liegenden Kondensatoren C 33, C 42, C 46 und C 52 unterdrücken Störungen im Schaltmoment der Dioden.

An den Pufferelkos C 34 und C 47 stehen die unstabilierten Endstufen-/Versorgungsspannungen +28 V und -28 V an, wobei R 20, R 21 zum schnellen Entladen der Elkos nach dem Ausschalten des Verstärkers dienen. C 35, C 39, C 43 und C 48 unterdrücken hier hochfrequente Störanteile. Diese Aufgabe haben auch die Ferrite L 5 bis L 8 in den einzelnen Versorgungsleitungen auf der Leiterplatte.

Eine zusätzliche Pufferung der Endstufenanspannungen wird mit C 41, C 45 erreicht und die Spannungen für IC 1 liegen

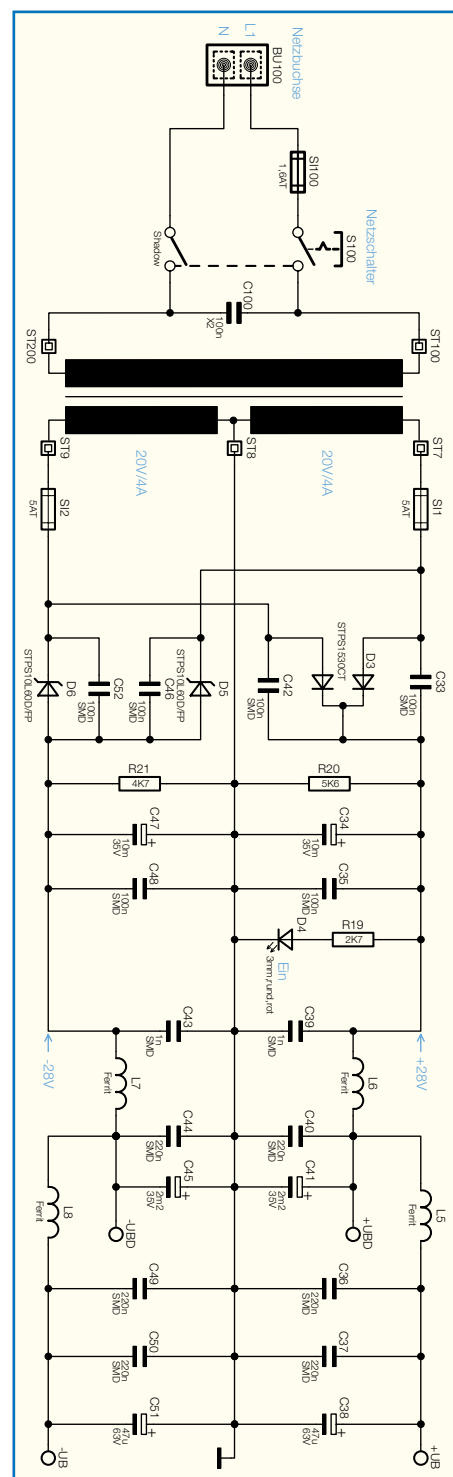


Bild 8: Die Schaltung des Netzteils vom DA 150

an C 38 und C 51 an. Hier dienen L 5 und L 8 zur Entkopplung und die Keramik Kondensatoren C 36, C 37, C 49 und C 50 unterdrücken unerwünschte Hochfrequenzstörungen.

Die über R 19 mit Spannung versorgte Leuchtdiode D 4 zeigt die Betriebsbereitschaft des Gerätes an. Die Schaltungsbeschreibung ist damit abgeschlossen und im zweiten Teil des Artikels erfolgt die ausführliche Beschreibung des praktischen Aufbaus.