



Digitale Audio-Power mit Class-T-Verstärker

Mit der neuen Class-T-Technologie von Tripath hat die digitale Revolution auch im Bereich der Audio-Endverstärker begonnen. Der hier vorgestellte Single-Chip-Stereo-Verstärker mit 2x15-W-Sinus-Ausgangsleistung zeigt die Funktionsweise dieser Technologie. Die wesentlichen Vorteile sind der hohe Wirkungsgrad bei ausgezeichneten technischen Daten und die geringen Abmessungen, da keine Kühlkörper benötigt werden. Auch Verstärker mit 500-W-Ausgangsleistung und mehr sind mit dieser Technologie realisierbar.

Allgemeines

NF-Leistungsverstärker gehören zu den wichtigsten Komponenten im Audio-Bereich und sind genauso in vielen Konsumer- und PC-Anwendungen zu finden. Neben der Ausgangsleistung und den Klangdaten, wie z. B. dem Klirrfaktor, spielt dabei die Effektivität eine wichtige Rolle.

Class-A- und A/B-Verstärker

Nach wie vor arbeiten heute die meisten Audioverstärker in Class-A/B- oder A-Betrieb. Diese traditionelle Verstärkertechnologie ist jedoch äußerst ineffizient, da eine große Menge Energie als reine Verlustwärme verloren geht. Bei diesen linearen Verstärkern wird in den meisten Fällen mehr als die Hälfte der zugeführten Ener-

gie an Kühlkörpern, die oft zudem noch einen erheblichen Platzbedarf haben, regelrecht „verbraten“. Die wahren Energieverschwender sind dabei die Verstärker im A-Betrieb, da die theoretisch maximale Effizienz 25 % beträgt. Daher ist diese Verstärker-Betriebsart, die ohne Eingangssignal die höchste Verlustleistung hat, relativ selten anzutreffen.

Der in den meisten Verstärkern genutzte

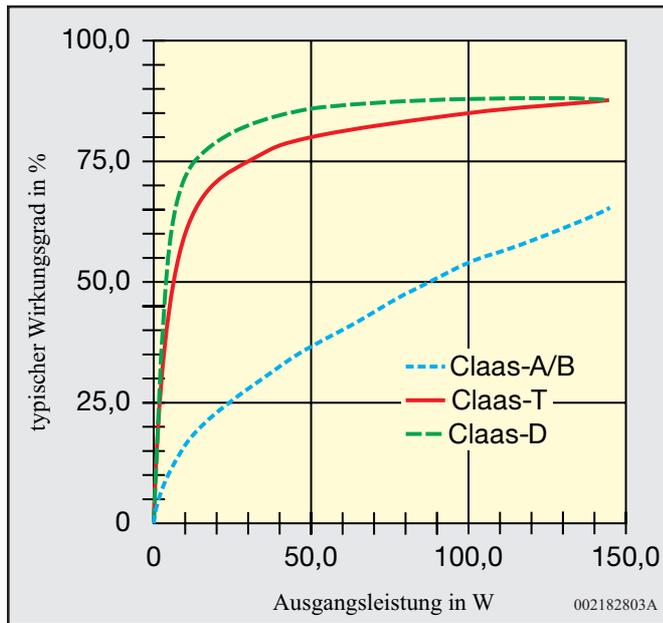


Bild 1: Der Wirkungsgrad von Class A/B-, Class-D- und Class-T-Verstärkern im Vergleich

A/B-Betrieb mit einer theoretisch maximalen Effizienz von 78,5 % sieht da auf den ersten Blick schon wesentlich besser aus. Unter Hörbedingungen in der Praxis, bei 30 % Vollast, stellt sich dann auch nur noch ein Wirkungsgrad um die 35 % ein.

Natürlich erfordern solche Verstärker auch entsprechend großzügig dimensionierte Netzteile. Als Vorteil ist jedoch zu nennen, dass relativ einfach hervorragende Klangdaten realisierbar sind.

Class-D-Verstärker

Eine gute Effektivität hingegen haben digitale Verstärker, die in Class-D-Technik auch seit langem bekannt sind. Diese getakteten Verstärker arbeiten dann wie viele Schaltnetzteile mit Pulsweiten-Modulation. Seit Einführung der Power-MOSFET-Transistoren in den 70er Jahren ist dieser Verstärkertyp, dessen maximaler Wirkungsgrad bei etwa 80 % bis 90 % liegt, am Markt anzutreffen. Selbst unter typischen Hörbedingungen liegt der Wirkungsgrad eines Class-D-Verstärkers noch zwischen 65 % und 80 %. Der gute Wirkungsgrad muss jedoch mit relativ schlechten Klangdaten und hohem Klirrfaktor (Verzerrungen) erkauft werden.

Des Weiteren ist die Pulsweiten-Modulation bei Verstärkern unter EMV-Gesichtspunkten (elektromagnetische Verträglichkeit) äußerst problematisch und schwer in den Griff zu bekommen. Der Einsatz in höherwertigen HiFi-Anlagen kommt aufgrund der mäßigen Klang-Daten nicht in Frage.

Die Philosophie der getakteten Verstärker beruht darauf, dass die Leistungs-Halbleiter der Endstufe entweder vollständig durchgeschaltet oder gesperrt sind. Nur in einer möglichst kurzen Phase, während des Umschaltvorgangs (Übergang von

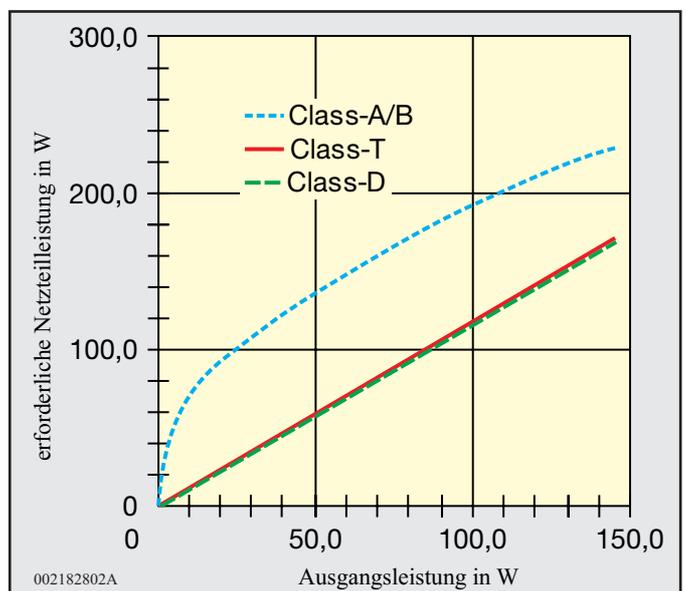
„High“ nach „Low“ oder umgekehrt), befinden sich die Halbleiter im linearen Betrieb.

Je steiler die Schaltflanken, desto geringer die Verlustleistung. Der Nachteil von steilen Schaltflanken sind die dadurch entstehenden hochfrequenten Störungen, so dass in der Praxis ein guter Kompromiss zwischen der Steilheit der Schaltflanken und den Störungen im Funkfeld bzw. der netzgebundenen Störungen zu finden ist.

Neben den Schaltverlusten sind bei den getakteten Verstärkern weitere Verluste in erster Linie vom R_{DS-ON} -Widerstand der verwendeten Power-MOSFET-Transistoren abhängig. Der R_{DS-ON} -Widerstand sollte möglichst gering sein.

Das eingangsseitig zugeführte Audiosignal wird mit Hilfe eines PWM-Controllers in ein pulswertenmoduliertes Signal umgewandelt und der Endstufe zugeführt. Mit

Bild 2: Erforderliche Netzteil-Leistung in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung bei den drei Verstärkertypen



Hilfe eines Ausgangsfilters wird dann das NF-Signal zurückgewonnen. Für einigermaßen akzeptable Verzerrungen (Klirrfaktor) ist unbedingt eine Bandbegrenzung des Eingangssignals auf 60 % der PWM-Schaltfrequenz erforderlich, da Intermodulations-Störungen die Hauptprobleme bei Class-D-Verstärkern sind.

Auch wenn die Schaltung eines Class-D-Verstärkers nicht unbedingt kompliziert ist, muss die Leiterbahnführung im Layout, und hier insbesondere die Masseführung, mit höchster Sorgfalt vorgenommen werden. Interferenzen zwischen Schalt-Transienten und Signalen mit niedrigen Pegeln sind sonst unweigerlich die Folge. Diese Störungen beeinflussen in erheblichem Maße die Klangqualität des Verstärkers.

Class-T-Verstärker

Eine neue Verstärker-Technologie stellt nun die High-Tech-Firma Tripath aus den USA zur Verfügung. Diese getakteten Verstärker-Bausteine sehen von der Beschaltung wie Class-D-Verstärker aus, da am Ausgang ebenfalls Rechteck-Signale zur Verfügung stehen und dementsprechende Ausgangsfilter benötigt werden.

Im Gegensatz zu Class-D-Verstärkern haben Class-T-Verstärker, die mit der sogenannten Digital-Power-Processing™ (DPP™) Technologie arbeiten nur sehr geringe Intermodulations-Verzerrungen.

Class-T-Verstärker arbeiten auf einer adaptiven Spread-Spektrum-Basis mit Abtastfrequenz zwischen 200 kHz und 1,5 MHz.

Die hochintegrierten Verstärkerbausteine bestehen aus allen digitalen und analogen Komponenten, die zum Aufbau der Verstärker benötigt werden. Im Wesentlichen ist ein Signalprozessor integriert, der mit Hilfe von adaptiven Algorithmen die

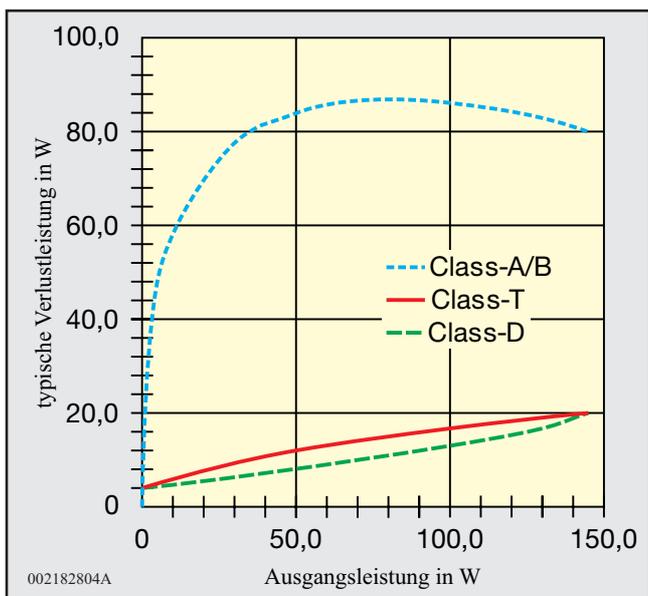


Bild 3: Verlustleistung in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung bei Class A/B, Class D und Class T

durch Laden und Entladen von parasitären Kapazitäten des Lautsprechersystems erhebliche Verluste entstehen. Die Induktivitäten im Ausgangsfilter entkoppeln somit auch den Verstärker aus dem Lautsprechersystem.

Da bei Class-T-Verstärkern die Rückkopplung bereits vor den Filtern erfolgt, erhöhen diese nicht den Klirrfaktor. Entscheidend für die HF-Eigenschaften sind das richtige Kernmaterial der Spulen und das Material der verwendeten Kondensatoren.

Einsatzmöglichkeiten für Class-T

Die Einsatzmöglichkeiten der neuen Verstärkertechnologie sind vielfältig. Neben Verstärkern mit hoher Leistung wird sicherlich die Class-T-Technologie auch in vielen Consumerprodukten Einzug halten. Besonders dann, wenn wenig Platz zur Verfügung steht oder die Abfuhr von Verlustwärme schwierig ist. So sind Mini-Kompaktanlagen und Computer-Audio-Systeme hier wohl die interessantesten Einsatzgebiete, während Heimanlagen aufgrund von Standardgehäusen meistens genügend Platz für Class-A/B-Verstärkern mit den erforderlichen Kühlkörpern bieten. Weitere interessante Einsatzgebiete für Class-T sind im Car-HiFi-Bereich zu finden.

Der nächste Entwicklungsschritt sind sogenannte „True Digital Amplifier“, bei denen ein digitales Eingangssignal, z. B. von einem CD-Player oder das decodierte Digital-Signal eines DVD-Players, erstmals kurz vor den Lautsprecherklemmen in ein analoges Audiosignal konvertiert wird. Entsprechende Verstärkerbausteine von Tripath stehen kurz vor der Markteinführung. Erst dann können wir tatsächlich von einem digitalen Verstärker sprechen.

Charakteristiken der FET-Transistoren lernt, um im exakten Timing dann diese steuern zu können.

Je nach Leistungsanforderung sind Verstärkerbausteine mit integrierten Ausgangs-FETs (für kleine und mittlere Leistungen) und solche, bei denen externe Transistoren (für hohe Leistungen) erforderlich sind, verfügbar.

Grundsätzlich kann jedoch gesagt werden, dass durch den hohen Integrationsgrad bei den Tripath-Verstärkerbausteinen die Entwicklung eines digitalen Verstärkers relativ einfach ist. Wie bei den Class-D-Verstärkern ist auch hier für gute technische Daten das Layout, und dabei insbesondere die Masseführung, von ausschlaggebender Bedeutung.

Der Wirkungsgrad im Vergleich

Der Wirkungsgrad von Class-T-Verstärkern ist direkt mit PWM-Verstärkern in Class-D-Technologie vergleichbar, während die Klangqualität mit der Class-A/B-Technik vergleichbar ist. Abbildung 1 zeigt die typische Effektivität der drei zuvor beschriebenen Verstärkertechnologien im Vergleich.

Je höher die Effektivität, desto kleiner kann das Netzteil und der Kühlkörper, sofern überhaupt erforderlich, ausfallen. Die vorzuhaltende Netzteilleistung der drei verschiedenen Systeme im Vergleich zeigt Abbildung 2. Wie zu sehen ist, benötigt ein Class-A/B-Verstärker ca. 35% mehr Netzteilleistung als die beiden getakteten Verstärkervarianten.

Noch wesentlich gravierender ist der Vergleich der drei Systeme bei den erforderlichen Kühlkörpern.

Wie in Abbildung 3 zu sehen, entsteht bei den beiden getakteten Systemen ca. 300% weniger Verlustleistung am Kühl-

körper als bei einem A/B-Verstärker. Class-T-Verstärker können somit von den Abmessungen und vom Gewicht her wesentlich kleiner ausfallen als traditionelle Verstärker bei vergleichbaren technischen Daten.

Ausgangsfilter

Da an den direkten Verstärker ausgängen hochfrequente Rechtecksignale anliegen, sind zur Rekonstruktion der Audioinformation unbedingt Ausgangsfilter erforderlich. Des Weiteren sind diese Filter erforderlich, um die EMV-Vorschriften einhalten zu können. Die hier auftretenden Signalkomponenten liegen im Frequenzbereich von 500 kHz - 50 MHz, die ohne Filter über die Lautsprecherleitungen abgestrahlt würden.

Ein direkter Anschluss des Lautsprechers an die Digitalausgänge des Verstärkers würde außerdem dazu führen, dass

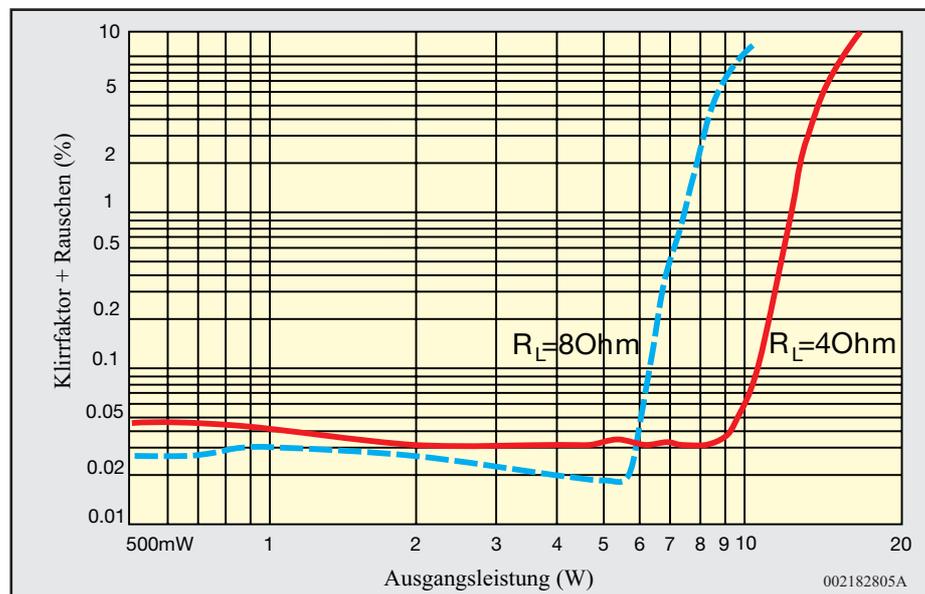


Bild 4: Klirrfaktor und Rauschen in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung

Single-Chip-Stereo-Verstärker

Kommen wir nun zu unserem kleinen Single-Chip-Stereo-Verstärker, der 2 x 15-W-Sinus an 4-Ω-Lautsprecher abgeben kann, ohne dass Kühlkörper erforderlich sind. Die gesamte Schaltung ist inklusive Ausgangsfilter, Cinch-Eingangsbuchsen und Stereo-Lautstärkepoti auf einer Leiterplatte mit den Abmessungen 100 mm x 63 mm untergebracht. Die Stromversorgung erfolgt über eine 3,5-mm-Klinkenbuchse und für die beiden Lautsprecher stehen 4 Lötstifte mit Öse zur Verfügung, die mit den an der Gehäuserückwand angeschraubten Lautsprecher-Klemmanschlüssen zu verbinden sind.

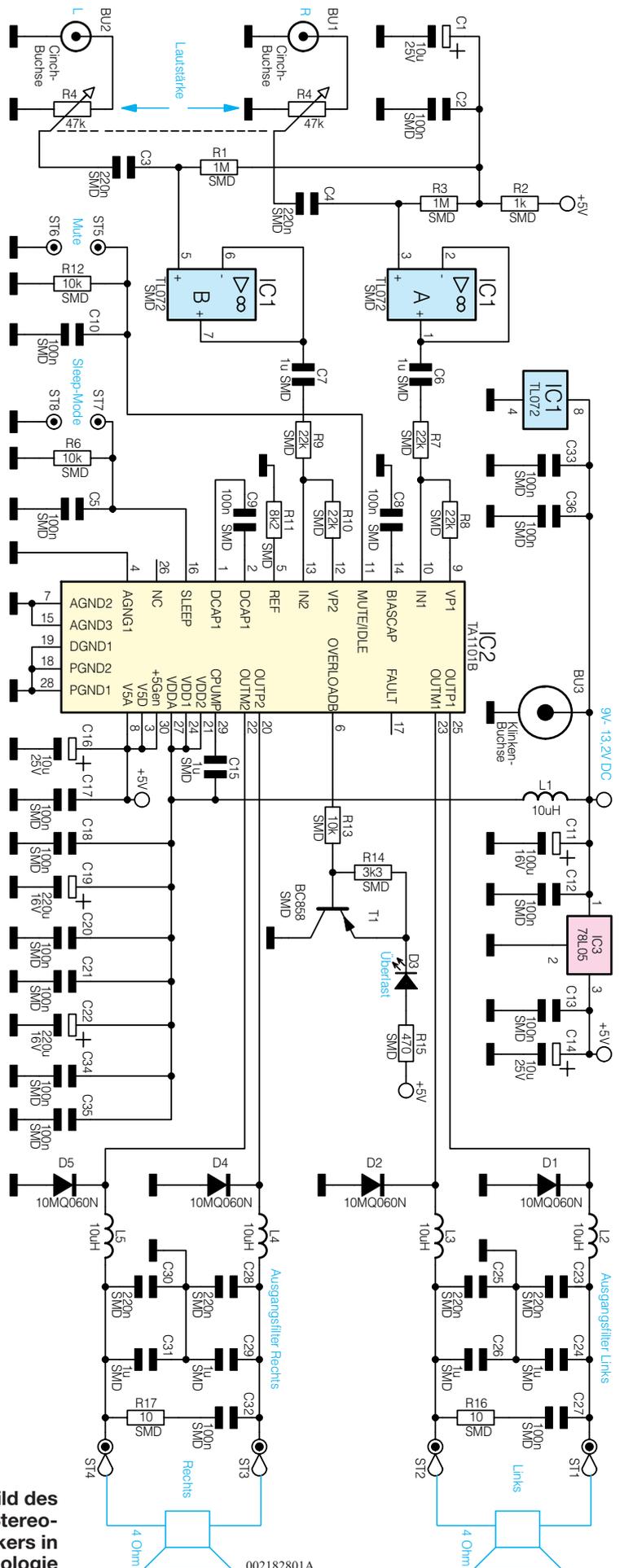
Die Einsatzmöglichkeiten dieses Verstärkers sind vielfältig und überall möglich, wo 12-V-Versorgungsspannung zur Verfügung steht.

Z. B. in Verbindung mit PC-Soundkarten und entsprechenden Lautsprechern sind weitaus bessere Klangeigenschaften möglich, als mit den meisten am Markt angebotenen Aktivboxen, auch wenn diese z. T. mit extremen Ausgangsleistungen (200 W PMPO und mehr) angepriesen werden.

Doch was verbirgt sich nun hinter der aus Fernost stammenden Bezeichnung PMPO? Nichts anderes als die Leistung, die der eingesetzte Lautsprecher gerade einmal 0,5 s verkraften kann, ohne zerstört zu werden. Mit dem eingesetzten Verstärker hat das überhaupt nichts zu tun und genauso wenig mit der Qualität des Lautsprechers. Auch wenn die „PMPO-Leistung“ im Grunde genommen nichts über die Leistungsabgabe und die Qualität aussagt, kommt diese Angabe (die ca. 10 bis 20fach über der tatsächlichen Leistung liegt) vielen Marketingstrategen gerade recht. Denn für die Vermarktung von oftmals minderwertigen Produkten interessieren nunmal möglichst große Zahlenwerte. Schließlich

Technische Daten: Digital-Verstärker T 30	
Ausgangsleistung:	... 2 x 15 W an 4 Ω 2 x 10 W an 8 Ω
Wirkungsgrad:	88 % bei 10 W an 8 Ω 81 % bei 15 W an 4 Ω
Dynamikbereich: 102 dB
Klirrfaktor: 0,04 % bei 9 W an 4 Ω
Signaleingänge: Cinch-Buchsen (770 mV _{eff} = Vollaussteuerung)
Eingangswiderstand: 47 kΩ
Signalausgänge:	Lautsprecher-Klemmleisten
Anzeigen: Überlast-LED
Betriebsspannung: 9 V - 13,2 V (Leerlauf bis 16 V)
Stromaufnahme bei Volllast:	3 A bei 12 V
Platinenabmessungen: 10 x 63 mm

Bild 5: Schaltbild des 2 x 15-W-Stereo-Verstärkers in Class-T-Technologie



weiß kaum ein Anwender, dass dies die erforderliche Leistung ist, um den eingesetzten Lautsprecher in 0,5 s zu zerstören. Für seriöse Leistungsangaben ist nach wie vor die Sinus-Dauerleistung entscheidend.

Doch nun zurück zu unserem Verstärker, der bezüglich nicht-linearer Verzerrungen und Rauschen sehr gute Werte erreichte. Abbildung 4 zeigt den Klirrfaktor und das Rauschen in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung.

Schaltung

Das Schaltbild des ELV-Stereo-Verstärkers mit dem Tripath-Baustein TA1101B ist in Abbildung 5 dargestellt. Da alle wesentlichen Komponenten inklusive der Endstufen-Transistoren im TA1101B integriert sind, werden nur noch wenige Bauteile an externer Beschaltung benötigt.

Dank doppelseitig durchkontaktierter

Leiterplatte, die an der Platinenunterseite fast ausschließlich zur Abschirmung dient, konnte eine hervorragende Masseführung erreicht werden.

Das Audio-Eingangssignal des rechten und linken Stereo-Kanals wird der Schaltung an den Cinch-Buchsen BU 1, BU 2 zugeführt und gelangt von hier aus direkt auf das Stereo-Lautstärkepoti R 4. Das Poti mit 47 k Ω bestimmt gleichzeitig den Eingangswiderstand der Schaltung. Jeweils vom Schleifer des Lautstärkepotis gelangen die Audio-Informationen dann auf die in IC 1 integrierten Pufferverstärker und stehen an dessen Ausgängen niederohmig zur Verfügung.

Über C 6 und C 7 zur galvanischen Entkopplung gelangen die Audiosignale auf die Verstärkereingänge des TA1101B (IC 2).

Im Blockschaltbild (Abbildung 6) ist die interne Struktur des ICs grob dargestellt.

Mit den Eingangsverstärkern ist die Grundverstärkung der Schaltung so festgelegt, dass 770-mV_{eff}-Eingangssignal zur Vollaussteuerung dienen. Danach erfolgt dann die Umwandlung in Digitalsignale zur Steuerung der chipinternen Feldeffekt-Leistungstransistoren.

In Form von Rechteck-Impulsen steht das Digitalsignal des rechten Kanals an Pin 23, Pin 25, und das Digitalsignal des linken Kanals an Pin 20, Pin 22 zur Verfügung. Mit Hilfe der schnellen Schottky-Dioden D 1, D 2 sowie D 4 und D 5 werden negative Signalanteile unterdrückt.

Die Umwandlung der digitalen Audio-Ausgangs-Informationen in analoge NF-Signale, für die an ST 1, ST 2 sowie die an ST 3, ST 4 anzuschließenden Lautsprecher, wird mit den nachgeschalteten LC-Tiefpass-Filterkombinationen (Siebglieder) vorgenommen. Dabei kann die Grenzfrequenz, die in unserer Schaltung bei ca. 45 kHz liegt, der Filter höher als bei einfachen PWM-Verstärkern angesetzt werden.

Kritisch ist der Betrieb von Digitalverstärkern ohne Lastimpedanz (Lautsprecher), da an den Ausgangsfiltern hohe Spannungsspitzen entstehen können, die u. U. zur Zerstörung der Leistungs-FETs führen. Weiterhin kann es dann am Ausgang zu Schwingneigungserscheinungen kommen. Um diese Probleme zu verhin-

dern, ist jeweils parallel zum Lautsprecherausgang ein RC-Glied (C 27, R 16 und C 32, R 17) geschaltet.

Die Betriebsspannung (9 V - 13,2 V_{DC}) wird dem Verstärker an BU 3 zugeführt und gelangt über L 1 direkt auf den TA1101B. Die Elkos C 19 und C 22 dienen zur Pufferung an den entsprechenden IC-Eingängen und die Keramik-Kondensatoren C 18, C 20, C 21, C 34 und C 35 sind zur HF-Abblockung an kritische Stellen im Layout angeordnet. Zur Versorgung des Prozessorteils ist eine stabilisierte Spannung von 5 V erforderlich, die mit Hilfe des Spannungsreglers IC 3 generiert wird. In diesem Bereich dienen C 11 bis C 14 zur Pufferung und allgemeinen Stabilisierung.

Bei Übersteuerung des Verstärkers wechselt der Logik-Pegel an Pin 6 von „High“ nach „Low“, so dass der Transistor T 1 durchsteuert. Die nun mit Spannung versorgte Leuchtdiode D 3 signalisiert diesen Zustand.

Mit einem 5-V-Logikpegel (High-Signal) an ST 5 gegenüber Schaltungsmasse (ST 6) kann eine Stummschaltung der Lautsprecherausgänge erfolgen. Die Stromaufnahme des Bausteins liegt dann zwischen 5 mA und 7 mA.

Ein High-Signal an ST 7 gegenüber Schaltungsmasse (ST 8) schaltet alle wesentlichen Funktionsgruppen des TA1101B ab. Die typische Stromaufnahme beträgt dann nur noch 0,25 mA, wobei max. 2 mA von Tripath spezifiziert ist.

Nachbau

Der praktische Aufbau dieses Verstärkers ist zwar unkompliziert, setzt jedoch Löt Erfahrung voraus, da besonders beim Tripath-IC der Pinabstand mit ca. 0,5 mm sehr gering ist. Damit die Pins beim Lötvorgang optimal zugänglich sind, sollte dieses IC auch vor allen anderen Bauteilen aufgelötet werden. Die Bestückung wird entsprechend der Stückliste, des Bestückungsplanes und des auf der Leiterplatte vorhandenen Bestückungsdruckes vorgenommen.

Vor dem Auflöten ist die Metallunterseite des ICs zur besseren Wärmeabfuhr mit Wärmeleitpaste zu bestreichen. Das gleiche gilt auch für die Platinenoberfläche in diesem Bereich. Dann wird ein Löt pad der Leiterplatte, vorzugsweise an einer Gehäuseecke, vorverzinkt und das Verstärker-IC mit einer Pinzette exakt positioniert und am vorverzinkten Löt pad angelötet. Dazu ist ein Löt kolben mit besonders feiner Lötspitze erforderlich, und die korrekte Polarität des an Pin 1 durch einen Punkt gekennzeichneten ICs ist unbedingt zu beachten. Sobald das IC mit allen Anschlusspins auf den vorgesehenen Löt pads aufliegt, erfolgt das vollständige Verlöten.

Das Verarbeiten des 8-poligen Puffer-

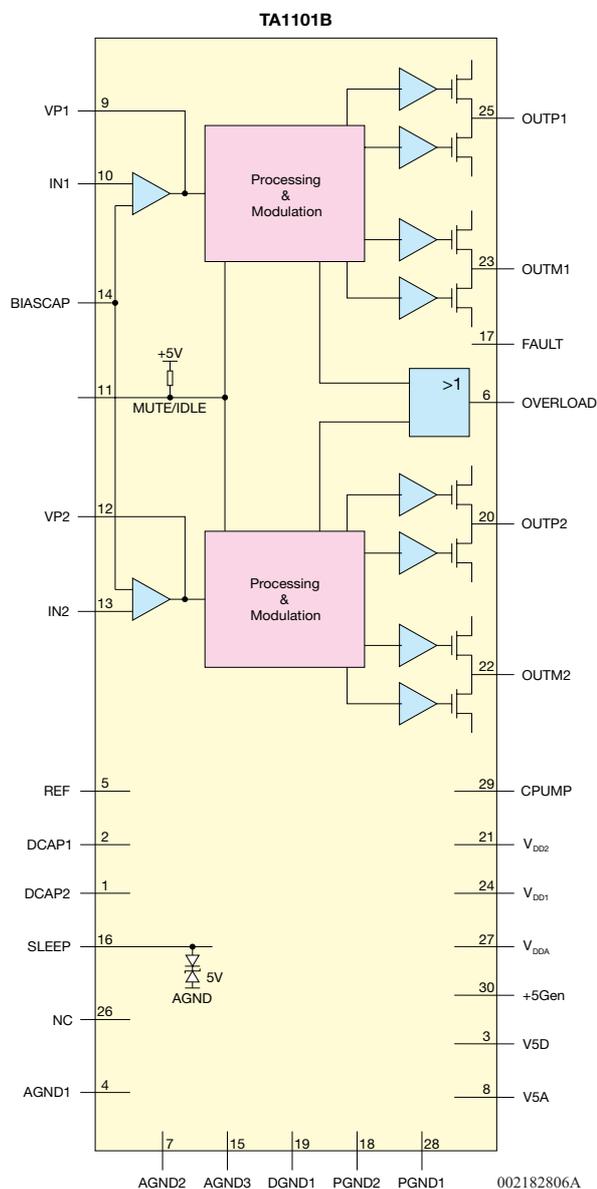
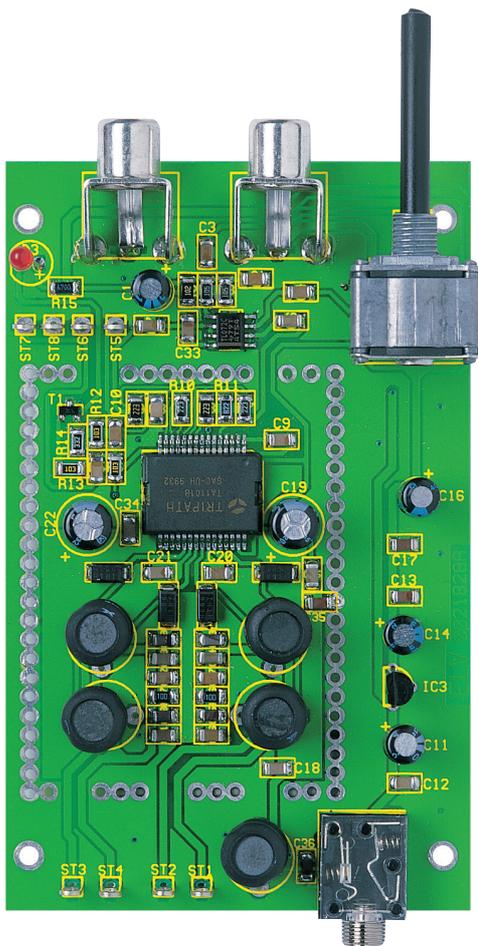
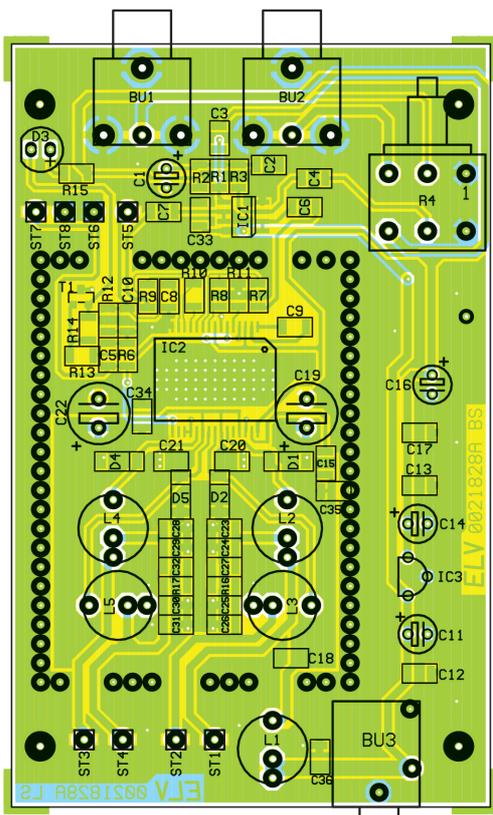


Bild 6: Interne Struktur der Stereo-Digital-Verstärker-Bausteins TA1101B



Ansicht der fertig bestückten Platine (oben) des digitalen Audio-Verstärkers T 30 mit zugehörigem Bestückungsplan (unten)



verstärkers (IC 1) und des Transistors T 1 folgt in der gleichen Weise.

Als dann sind die SMD-Widerstände aufzulöten, wobei der Widerstandswert direkt auf dem Gehäuse aufgedruckt ist. Die letzte Ziffer des Aufdrucks gibt die Anzahl der Nullen an.

Eine hohe Verwechslungsgefahr hingegen besteht bei den SMD-Kondensatoren, da diese Bauteile nicht gekennzeichnet sind. Es empfiehlt sich daher, diese Teile erst direkt vor dem Verlöten aus der Verpackung zu nehmen.

Die im Anschluss hieran zu bestückenden SMD-Dioden sind an der Katodenseite durch einen Ring gekennzeichnet.

Jetzt bleiben nur noch einige konventionelle bedrahtete Bauelemente zu bestücken. Den Anfang machen dabei 8 Lötstifte mit Lötöse, die stramm in die dazugehörigen Platinenbohrungen zu pressen sind. Erst danach erfolgt das Verlöten an der Platinenunterseite.

Ebenfalls sind die Pilskern-Spulen (L 1 bis L 5) und die am Minuspol gekennzeichneten Elektrolyt-Kondensatoren an der Platinenunterseite zu verlöten und die überstehenden Drahtenden mit einem scharfen Seitenschneider direkt oberhalb der Lötstelle abzuschneiden.

Mit viel Lötzinn sind danach das Stereo-Lautstärkepoti R 4 und die beiden Eingangs-Cinchbuchsen einzulöten, während beim Lötvorgang die 3,5-mm-Klinkenbuchse BU 3 nicht zu heiß werden darf.

Als letztes Bauelement auf der Leiterplatte bleibt dann nur noch die Leuchtdiode D 3 übrig, die mit 23 mm Abstand, gemessen von der LED-Spitze bis zur Platinenoberfläche, einzubauen ist.

Über einen Silberdrahtabschnitt wird die Metallfläche der Lautstärkepoti-Rückseite mit der Platinenmassefläche verbunden.

3 cm lange, 1-adrig isolierte Leitungen sind an ST 1 und ST 2 und 5 cm lange, 1-adrig isolierte Leitungen an ST 3 und ST 4 anzulöten.

Gehäuseeinbau

Zuerst wird an der Rückplatte die Lautsprecherklemmleiste mit 2 Schrauben M3x 10 mm und den zugehörigen Fächerscheiben und Muttern befestigt.

Die von ST 1 bis ST 4 kommenden 1-adrig isolierten Leitungen werden nun an die Lötösen der Lautsprecherklemmleiste angelötet. Dabei ist ST 1 mit +L, ST 2 mit -L, ST 3 mit +R und ST 4 mit -R zu verbinden.

Zur Aufnahme der Leuchtdiode wird ein Montageclip in die Frontplatte gesetzt und die Platine zusammen mit der Front- und Rückplatte in das Gehäuseunterteil abgesetzt. Mit 4 Knippingschrauben 2,9 x 6,5 mm ist danach die Platine im Gehäuseunterteil festzuschrauben.

Stückliste: Digital-Verstärker T 30

Widerstände:

10Ω/SMD	R16, R17
470Ω/SMD	R15
1kΩ/SMD	R2
3,3kΩ/SMD	R14
8,2kΩ/SMD	R11
10kΩ/SMD	R6, R12, R13
22kΩ/SMD	R7-R10
1MΩ/SMD	R1, R3
Poti, 4 mm, stereo, 47kΩ	R4

Kondensatoren:

100nF/SMD	C2, C5, C8-C10, C12, C13, C17, C18, C20, C21, C27, C32-C36
220nF/SMD	C3, C4, C23, C25, C28, C30
1µF/SMD	C6, C7, C15, C24, C26, C29, C31
10µF/25V	C1, C14, C16
100µF/16V	C11
220µF/16V	C19, C22

Halbleiter:

TL072/SMD	IC1
TA1101B/SMD	IC2
78L05	IC3
BC858	T1
10MQ060N	D1, D2, D4, D5
LED, 3 mm, rot	D3

Sonstiges:

- Pilskerndrossel, 10µH
- Cinch-Einbaubuchsen, print BU1, BU2
- Klinkenbuchse, 3,5 mm, print, mono
- Lötstifte mit Lötöse
- 1 LED-Montage-Clips, einteilig, 3 mm
- 1 Drehknopf mit 4-mm-Innendurchmesser, 12 mm, grau
- 1 Knopfkappe, 12 mm, grau
- 1 Pfeilscheibe, 12 mm, grau
- 1 Gewindestift mit Spitze, M3 x 4mm
- 1 Lautsprecher-Klemmanschluss, 4-polig
- 3 cm Schaltdraht, blank, versilbert
- 20 cm Schaltlitze, 0,22mm², schwarz
- 1 Tube Wärmeleitpaste, 5g
- 2 Zylinderkopfschrauben M3 x 10 mm
- 2 Muttern M3
- 2 Fächerscheiben M3
- 4 Knippingschrauben 2,9 x 6,5mm
- 4 Klebefüße

Nach dem Verschrauben des Gehäuse-oberteils mit dem Unterteil ist die Achse des Lautstärkepotis auf die erforderliche Länge zu kürzen und der Drehknopf zu montieren. Mit dem Anbringen von 4 selbstklebenden Gehäusefüßen wird der Nachbau abgeschlossen.