

555-Audioverstärker

Klasse D mit Oldtimer

Von
Frederik Crevits
(B)

Von seinen Entwicklern wurde der 555 zwar als Timer konzipiert, doch kreative Köpfe fanden für ihn im Lauf der Jahre zahllose weitere Wirkungskreise. In diese Gruppe reiht sich unser Klasse-D-Audioverstärker ein, mit einem 555 im Oszillator- und Modulatorteil. Das unkomplizierte Projekt beweist, dass Audio Klasse D auch einfach sein kann.



Unser Audioverstärker mit dem 555 ist ein unkomplizierter Klasse-D-Leistungsverstärker, der ohne Über-alles-Gegenkopplung arbeitet. Weil keine schwierig beschaffbaren Spezialbauteile vorkommen und keine komplizierten Einstellungen vorzunehmen sind, ist

der Verstärker im Handumdrehen betriebsfertig aufgebaut. Über den zugedachten Zweck hinaus kann er als Lehr- und Lernobjekt zum Thema „Einsatz digitaler Konzepte in der Audiotechnik“ dienen.

Obwohl der 555 bereits 1971 auf den Markt kam (!), hat dieser buchstäbliche *Old-Timer* nichts an Aktualität eingebüßt. Das liegt nicht zuletzt daran, dass der 555 in seinem Bereich ein unübertroffen vielseitiger, unkomplizierter und zuverlässiger Baustein ist. In unserem Klasse-D-Audioverstärker steuert der 555 über eine Pegelanpassung zwei MOSFETs des Typs IRF530, sie stellen eine Ausgangsleistung von gut 6 W bei THD+N = 1 % bereit. Die Betriebsspannung ist asymmetrisch, so dass auch das Netzteil auf der Linie der unkomplizierten Schaltungstechnik liegt. Allerdings bedeutet dies, dass die Lautsprecher über Koppelklos angeschlossen werden müssen.

Schaltung

Bild 1 zeigt die Schaltung des Klasse-D-Verstärkers in der Stereo-Version. Die folgende Beschreibung nimmt Bezug auf die Bauelemente des Kanals oben im Bild. Für den zweiten Kanal gelten sie in gleicher Weise.

Ein Klasse-D-Audioverstärker setzt das analoge Audio-Eingangssignal in ein pulsbreiten-moduliertes Signal um. Dieses Signal steuert die Transistoren der Endstufe. Die Pulsbreiten-Modulation ist hier mit dem 555 realisiert, er ist als Rechteckoszillator (astabiler Multivibrator, AMV) geschaltet. Das analoge Audiosignal wird der Spannung an Ladekondensator C2 überlagert. Normalerweise lädt eine konstante Span-

Messwerte

- Eingangsempfindlichkeit: 580 mV (THD+N = 1 %) 830 mV (THD+N = 10 %)
- Eingangsimpedanz: 11 k Ω
- Dauerausgangsleistung: 6,3 W (THD+N = 1 %) 10,8 W (THD+N = 10 %)
- Leistungsbandbreite: 11 Hz...37,5 kHz (-3 dB) 21,5 Hz...31 kHz (-1 dB)
- Signalrauschverhältnis: 69 dB (1 W/8 Ω , B = 22 Hz...22 kHz)
- Harmonische Verzerrungen und Rauschen: 0,23 % (1 kHz, 1 W/8 Ω)
- Kanaltrennung: 42 dB (100 Hz, P_{max}) 54 dB (1 kHz, P_{max}) 60 dB (20 kHz, P_{max})
- Stromaufnahme: 0,8 A bei 2 · 6,3 W/8 Ω

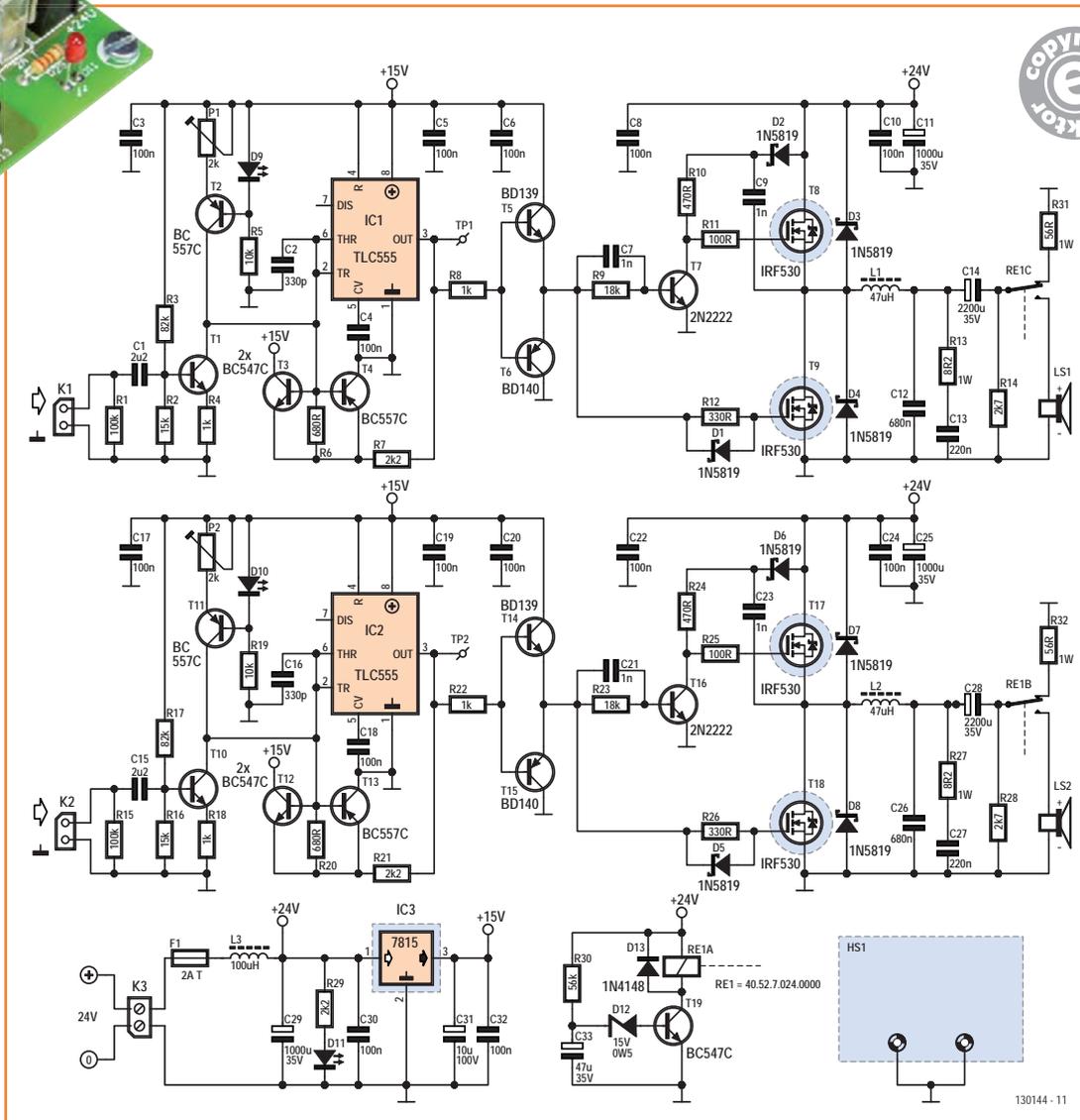


Bild 1. Schaltung des Klasse-D-Audioverstärkers mit dem 555, hier in der Stereo-Version. Die Lautsprecher werden von einem Relais verzögert an den Ausgang gelegt.

U/I-Umsetzer: Nur fast ideal

Die Schaltung mit T3 und T4 verbessert die Linearität erheblich, diese Lösung ist jedoch noch nicht ideal. Der Strom, der durch den Kondensator C4 fließt, ist die Summe von zwei Strömen: Der Strom, der von der Basis-Emitter-Spannung an R6 abhängt sowie der Strom, der in die Basis von T3 oder T4 fließt. Da der Kollektorstrom von T3 oder T4 vom Strom durch R7 beeinflusst wird, ändert sich auch die Basis-Emitter-Spannung und mit ihr der Basisstrom. Die Abhängigkeit ist nicht linear, weil die Transistoren nicht exakt komplementär sind. Dies hat zur Folge, dass Spannungsanstieg und Spannungsabfall unterschiedlich verlaufen.

Stückliste

Widerstände:

R1,R15 = 100 k
 R2,R16 = 15 k
 R3,R17 = 82 k
 R4,R8,R18,R22 = 1 k
 R5,R19 = 10 k
 R6,R20 = 680 Ω
 R7,R21,R29 = 2k2
 R9,R23 = 18 k
 R10,R24 = 470 Ω
 R11,R25 = 100 Ω
 R12,R26 = 330 Ω
 R13,R27 = 8Ω2, 1 W
 R14,R28 = 2k7
 R30 = 56 k
 R31,R32 = 56 Ω, 1 W
 P1,P2 = 2 k Mehrgang-Einstellpoti (Vishay Sfernice T93YB202KT20)

D13 = 1N4148
 T1,T3,T10,T12,T19 = BC547C
 T2,T4,T11,T13 = BC557C
 T5,T14 = BD139
 T6,T15 = BD140
 T7,T16 = 2N2222
 T8,T9,T17,T18 = IRF530
 IC1,IC2 = TLC555CP
 IC3 = 7815

Außerdem:

K1,K2 = Stiftkontaktleiste 2-polig, Raster 2,54 mm
 K3,LS1,LS2 = Schraub-Anschlussklemme 2-polig, Raster 5,08 mm
 RE1 = Relais 24 V/1,2 kΩ, 8 A, DPDT-CO (z. B. Finder 40.52.7.024.0000)
 F1 = Sicherung 2 AT, mit Sicherungshalter

und Kappe für Platinenmontage
 TP1,TP2 = Stiftkontakt 1-polig
 HS1 = Kühlkörper für MOSFETs (Aluplatte 130 · 50 mm, 1...2 mm stark)
 4 · Isolierscheibe für Gehäuse TO-220 (z. B. Bergquist SIL-PAD K-10, .006", TO-220)
 4 · Isolerring 3 mm
 Kühlkörper für IC3, 30 K/W (z. B. Fischer Elektronik SK 12 SA 32)
 Schaltnetzteil 24 V / ≥ 2,5 A
 Platine 130144-1 [1]



Kondensatoren:

C1,C15 = 2μ2/50 V, Raster 5/7,5 mm (z. B. Panasonic ECQV1H225JL)
 C2,C16 = 330 pF 1 % Polystyrol, Raster 7,18 mm (z. B. LCR Components EXFS/HR 330PF +/- 1%)
 C3...C6,C8,C10,C17...C20,C22,C24,C30,C32 = 100 n X7R, Raster 5,08 mm
 C7,C9,C21,C23 = 1 n MKT, Raster 5 mm
 C11,C25,C29 = 1000 μ/35 V stehend, Ø 12,5 mm, Raster 5 mm (z. B. Rubycon 35YXF1000MEFC12.5X25)
 C12,C26 = 680 n Polypropylen, Raster 15 mm (z. B. Panasonic ECWF2684JAQ)
 C13,C27 = 220 n MKT, Raster 5 mm
 C14,C28 = 2200 μ/35 V stehend, Ø 18 mm, Raster 5/7,5 mm (z. B. Panasonic EEUTP1V222)
 C31 = 10 μ/100 V stehend, Ø 6,3 mm, Raster 2,5 mm
 C33 = 47 μ/35 V stehend, Ø max. 8,5 mm, Raster 2,5 mm

Induktivitäten:

L1,L2 = 47 μH, 21 mΩ/8,5 A, Schalenkern (Murata Power Solutions 1447385C)
 L3 = 100 μH, 35 mΩ/5 A Ringkern (Würth Elektronik 7447070)

Halbleiter:

D1...D8 = 1N5819
 D9,D10 = LED rot, rechteckig 2 · 5 mm
 D11 = LED rot, 3 mm
 D12 = Zenerdiode 15 V/0,5 W

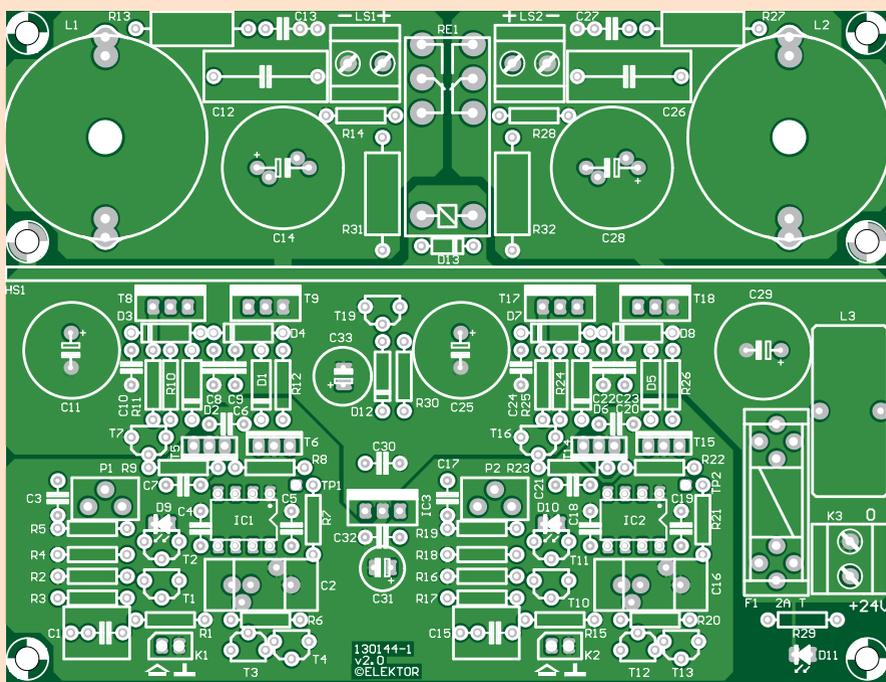


Bild 2. Platine für den Verstärker in der Stereo-Version. Die Aluplatte zur Kühlung der Endstufen-MOSFETs steht senkrecht auf der Platine. Wegen des Klasse-D-Konzepts ist die Wärmeentwicklung gering.

nung diesen Kondensator über einen Widerstand. Weil die Lade- und Entladespannung logarithmisch verlaufen, sind starke Nichtlinearitäten die Folge, was die Qualität eines Audioverstärkers sicher nicht steigert. Das Problem ist lösbar, indem der Kondensator nicht mit konstanter Spannung, sondern konstantem Strom geladen wird. Das übernehmen hier die Stromquelle mit T2 und der Spannungs-Strom-Umsetzer mit T3 und T4. Die Spannung an C2 verläuft nun nahezu dreieckförmig, das PWM-Ausgangssignal des 555 verhält sich bezogen auf das Eingangssignal fast linear. Das Audiosignal an K1 beeinflusst über T1 die Lade- und Entladezeiten des Kondensators C2, so dass ein pulsweiten-moduliertes Ausgangssignal entsteht. Die Schaltfrequenz beträgt ungefähr 250 kHz.

Damit die nachfolgende Stufe den 555 nicht unzulässig belastet, ist die aus T5 und T6 bestehende Pufferstufe nachgeschaltet.

Das gepufferte PWM-Signal steuert die mit den MOSFETs T8 und T9 aufgebaute Push-Pull-Leistungsstufe, sie liefert genügend Strom für den 4- Ω - oder 8- Ω -Lautsprecher. Wichtig ist hier, dass T8 und T9 niemals gleichzeitig im Leitzustand sein dürfen, in diesem Fall ist die Betriebsspannung kurzgeschlossen. Außerdem muss die so genannte Totzeit möglichst kurz sein, weil sie Verzerrungen im Audiosignal zur Folge hat. Die Totzeit ist die Zeit, in der beide MOSFETs gleichzeitig sperren. Bei der Betriebsspannung 15 V des 555 sind mit diesem Konzept an 4- Ω -Lasten nur geringe Ausgangsleistungen erzielbar. Um die Ausgangsleistung anzuheben, liegen die MOSFETs an der höheren Betriebsspannung 24 V.

In der Konfiguration von T8 und T9, wie sie in Bild 1 dargestellt ist, kann die steuernde Gate-Spannung an T8 nicht den Wert erreichen, der diesen MOSFET vollständig in die Sättigung steuert. Die Ausgangsspannung bleibt immer unter 15 V, viel Leistung wird als Verlustwärme an die Umwelt abgegeben.

Transistor T7 löst dieses Problem durch Bootstrapping der an T8 liegenden Gatespannung. Wenn am Eingang des Puffers T5/T6 die hohe Spannung 15 V liegt, wird T7 in den Leitzustand gesteuert, so dass T8 sperrt. Kondensator C9 lädt sich über D2 und T9 bis ungefähr 24 V auf. Zu dieser Zeit ist T9 im Leitzustand, denn sein Gate ist unmittelbar mit Puffer T5/T6 verbunden. Geht der Ausgang des Puffers auf die niedrige Spannung 0 V, sperren T7 und T9. Das hat zur

Folge, dass die Betriebsspannung 24 V in Reihe mit der an C9 liegenden Spannung geschaltet ist. Die Summe der Spannungen beträgt bezogen auf Masse ungefähr 45 V. Die hohe Spannung steuert T8 vollständig in den Leitzustand, die Schaltung arbeitet wie gewollt. Jetzt beträgt die Amplitude des PWM-Ausgangssignals 24 V, und die MOSFETs T8 und T9 bleiben fast kalt.

Die Totzeit wird von der Kombination D1/R12 so beeinflusst, dass die Einschaltzeit und die Ausschaltzeit von T9 unterschiedlich sind. Die Gate-Kapazität lädt sich langsam über R11 auf und entlädt sich schnell über D1.

Das LC-Glied L1/C12 am Verstärkerausgang dämpft die rechteckförmige 250-kHz-Komponente im Ausgangssignal. Die Werte sind so dimensioniert, dass die Eckfrequenz (-3-dB-Wert) bei 37 kHz liegt. Die RC-Kombination R13/C13 beugt unerwünschter Schwingneigung vor, falls keine Last am Ausgang angeschaltet ist.

Ein Spannungsregler 7815 (IC3) stellt die stabilisierte Spannung 15 V für den Schaltungsteil mit dem 555 bereit. Auf einen Überlastschutz wurde verzichtet, die Anschaltverzögerung mit T19 sorgt lediglich dafür, dass der Lautsprecher kein Einschaltgeräusch von sich gibt.

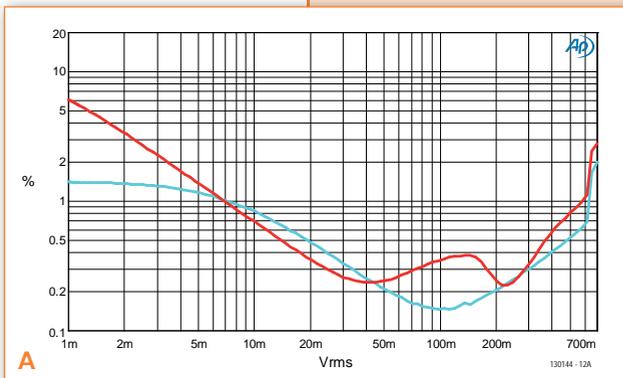
Als Stromversorgung eignet sich beispielsweise ein handelsübliches Schaltnetzteil, das 24 V liefert und mit mindestens 2,5 A belastbar ist. Die Drossel L3 in der Leitung der Betriebsspannung hält überlagerte, durch den Schaltbetrieb verursachte Störsignale vom Verstärker fern.

Aufbauen

Das Layout der Platine für den Verstärker in der Stereo-Version ist in **Bild 2** wiedergegeben. Alle verwendeten Bauelemente sind bedrahtet, so dass die Montage mit einfachem Lötgerät möglich ist. Auf der Platine steht die Kühlplatte der Endtransistoren senkrecht, sie dient hauptsächlich der Betriebssicherheit, denn die Endtransistoren werden höchstens lauwarm.

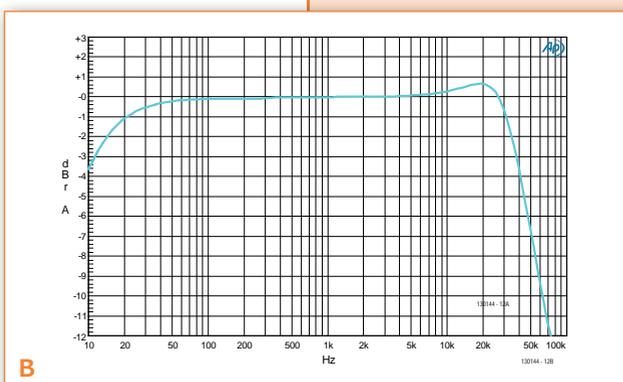
Die frequenzbestimmenden Kondensatoren C2 und C16 müssen von hoher Qualität sein, wir empfehlen den Einsatz von Polystyrol- oder Glimmer-Kondensatoren. Um die Temperaturdrift der Stromquellen T2 und T11 niedrig zu halten, müssen die rechteckförmigen LEDs D9 und D10 mit den Transistoren T2 und T11 paarweise in flächigem thermischem Kontakt stehen. Auf der Platine sind die zusammengehörigen Bauelemente benachbart angeordnet. Für die Induktivitäten L1

Messungen

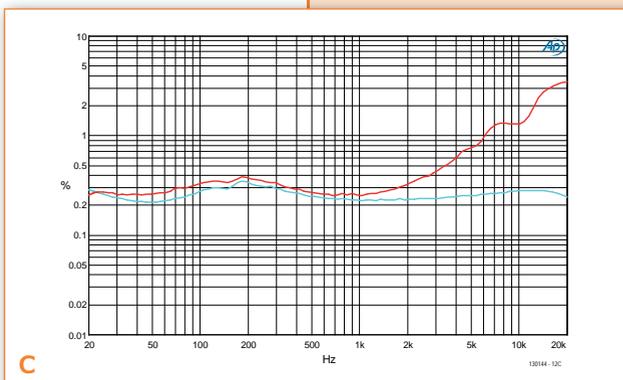


Wegen des vereinfachten Konzepts und der fehlenden Überalles-Gegenkopplung können Verzerrungsmessungen natürlich keine sensationell niedrigen Werte ergeben. Trotzdem sind die Ergebnisse mehr als zufriedenstellend. Uns erscheint bemerkenswert, dass sich die Anteile der Stufen an den Verzerrungen in bestimmten Aussteuerbereichen ganz oder teilweise kompensieren.

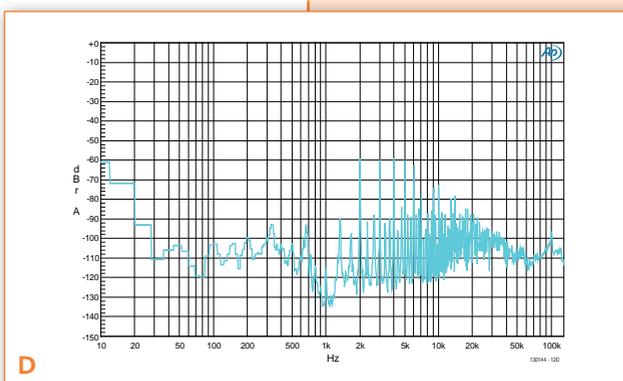
Plot A, der den Verlauf der THD abhängig vom Eingangssignal zeigt, führt den genannten Kompensationseffekt vor Augen ($f=1$ kHz, $B=22$ kHz). Die blaue Kurve stellt die Verzerrungen am Ausgang des 555 (Pin 3) nach Filtern des Oszillatorsignals dar, während die rote Kurve die Verzerrungen am Verstärkerausgang wiedergibt. Wenn die Eingangsspannung im Bereich 7...40 mV liegt, sind die Verzerrungen am Verstärkerausgang niedriger als am Ausgang des 555. Ursache können die Totzeit in der Endstufe (vergleichbar mit den Verzerrungen bei Klasse-B-Verstärkern) oder der passive Ausgangsfilter sein.



Plot B zeigt den Frequenzgang bei der Leistung 1 W an 8 Ω . Die untere Eckfrequenz (-3-dB-Wert) liegt bei 11 Hz, die obere Eckfrequenz bei 38 kHz, und bei etwa 19 kHz ist eine leichte Überhöhung um 0,66 dB zu beobachten. Die Überhöhung lässt sich mindern, indem die Kapazität von C12 (im anderen Kanal C26) auf 390 nF herabgesetzt wird. Allerdings hat dies auch zur Folge, dass die Unterdrückung der Oszillatorfrequenz um etwa 4 dB sinkt.



Plot C macht die Harmonischen Verzerrungen plus Rauschen (THD+N) als Funktion der Frequenz bei 8 Ω als Last sichtbar. Die rote Kurve gehört zu dem Signal vor dem Ausgangsfilter, die blaue Kurve zu dem Signal hinter diesem Filter. Daraus lässt sich entnehmen, dass der Filter seinen Zweck gut erfüllt und bei hohen Frequenzen die Intermodulationsprodukte effizient unterdrückt. Bei beiden Messungen kam das Klasse-D-Messfilter aus dem Jahr 2011 zum Einsatz [3], die Bandbreite des Analysers war auf 80 kHz begrenzt.



Plot D ist die FFT eines 1-kHz-Signals bei 1 W an 8 Ω . Die fünf Harmonischen, die für die Verzerrungen verantwortlich sind (THD+N = 0,23 %), liegen auf dem Pegel -60 dB. Außerdem sind Intermodulationsprodukte in Frequenzabständen von 326 Hz sichtbar. Ursache ist hier die Differenz der Taktfrequenzen, mit denen die Modulatoren arbeiten. Die Intermodulationsprodukte liegen unter -85 dB, sie verschwinden beim Abschalten eines Kanals. Die Intermodulationsprodukte treten nicht auf, wenn die Taktfrequenzen einen Abstand von mindestens 40 kHz haben.

und L2 an den Ausgängen empfehlen wir einen Schalenkern-Typ von Murata, für die Kondensatoren C12 und C26 einen Typ mit dem Dielektrikum Polypropylen.

Die MOSFETs haben wir durch keramische Unterscheiben von der Kühlplatte isoliert, Scheiben aus anderen Materialien wie beispielsweise Glimmer erfüllen den gleichen Zweck. Der erste Schritt beim Aufbau der Endstufe ist die mechanische Montage der MOSFETs auf der Kühlplatte. Die Anschlussdrähte werden so gebogen, dass sie in die zugehörigen Platinenbohrungen ragen, ohne dass auf die MOSFETs seitliche Kräfte einwirken. Die Kühlplatte wird mit zwei Bügeln auf der Platine befestigt, die Bügel stellen auch die Verbindung mit Masse her. Die Anschlussdrähte der MOSFETs werden erst nach der mechanischen Montage an die Platine gelötet.

Der Spannungsregler IC3, ein 7815, erhält ebenfalls einen Kühlkörper, zum Beispiel vom Typ SK12 SA32 des Herstellers Fischer Elektronik. Der Kühlkörper darf den Kondensator C33 thermisch nicht beeinflussen.

Einstellen

Verbinden Sie den Audiosignaleingang mit Masse und stellen Sie das Ausgangssignal des 555 (IC1) mit dem Mehrgang-Trimpoti P1 auf bestmögliche Symmetrie ein. Am Ausgang hinter L1 muss nun die halbe Betriebsspannung 12 V liegen. Damit ist der Klasse-D-Audioverstärker einsatzbereit. Schließen Sie eine Signalquelle und ein Boxenpaar an und lassen Sie sich vom ausgewogenen Klangbild dieses Verstärkers überraschen. Mit einem Röhrenverstärker hat er einiges gemeinsam.

(130144)gd

Weblinks

[1] www.elektor-magazine.de/130144

[2] www.elektor-labs.com/130144

[3] www.elektor-magazine.de/100540



Bild 3. Im Foto, aufgenommen von der Seite, sind die Bauelemente links und rechts der Kühlplatte sichtbar.

Bild 4. Bei diesem Laboraufbau wurden die Endstufen-MOSFETs auf keramischen Isolierscheiben mit der Kühlplatte verschraubt.

