

Entwicklungsbeschreibung Class-D-Verstärker

Freital, 24.01.2004

Funktionsbeschreibung:

Ausgangspunkt: Schaltung des Sörensen-Audio-Experiment <http://listen.to/audioexperiment>.

1. Aufbau auf Steckbrett

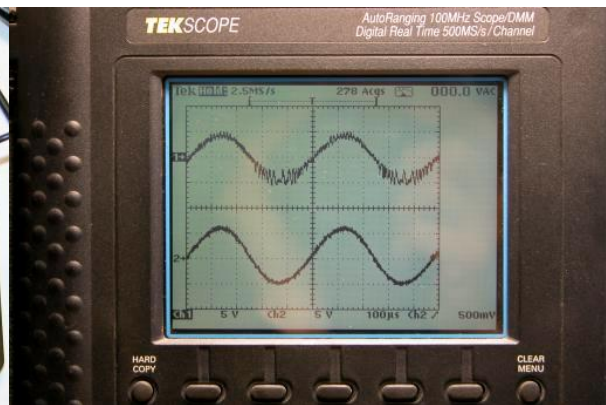
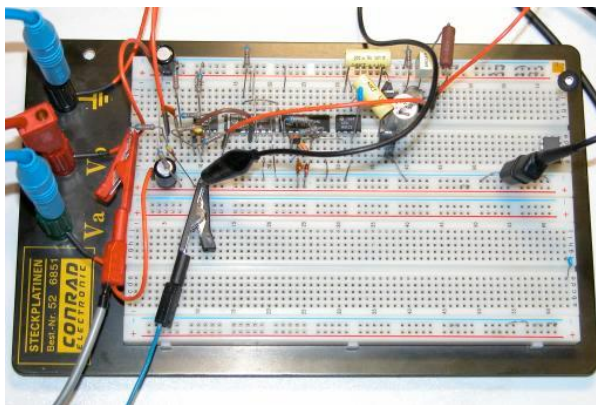
Änderungen: Betrieb als nichtinvertierender Verstärker (Nutzung NI-Input am 1. OPV)

Eingangs-OPV: BB OPA2604, Comp: PH LM319

Pufferstufe mit BF245A nicht aufgebaut (hier noch nicht notwendig)

Treiberhilfen BC546/556 nicht aufgebaut

MOSFET: 2N3055 / 2N2955, keine extra Endstufenversorgung (durchgängig +/-5V)



Ergebnisse:

Leerlaufstrom:

Betriebsspannung:

$U_B = +/-5,0V (R_L = \infty)$

Ausgangsspannungshub:

$I_B \approx +220/-110mA$ bei $R_L = 10\Omega$

$U_A = 10V_{SS}$

Generell scheint die Schaltung zumindest als Steckbrettaufbau ziemlich instabil, zu sehen u.a. an den parasitären Schaltflanken des Ausgangs (obere Kurve). Das scheint auch verständlich, da zunächst keine Synchronfrequenz vorgegeben ist. Damit richten sich die Ein-/Ausschaltssignale ausschließlich nach der Differenz $U_{in}-U_{out}$. Und die wird immer mit einem gewissen Rauschen behaftet sein, deshalb ist zu vermuten, daß sich nur schwer eine saubere PWM-Grundfrequenz erzielen läßt.

Ausweg ist die Erzeugung der PWM z.B. über einen Dreiecksgenerator. Um den Vorteil der Regelung zu behalten, könnte man das Nutzsignal über einen Differenzverstärker einspeisen, der dieses gleichzeitig mit dem Ausgangssignal vergleicht.

24./25.01.2004

sauberer Aufbau:

durchgehende Massefläche, alles abgeblockt, MOSFET-Spannung (+/-15V) getrennt von Treiberspannung (+12V) und Ansteuerung (+/-5V),

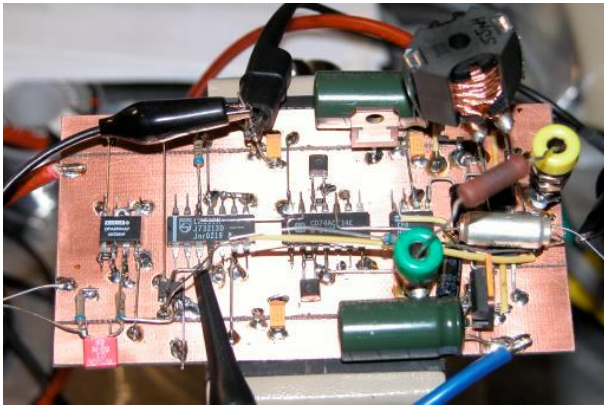
n-MOSFET: RFD14N05, 50V, 0,1 Ω , p-MOSFET IRFU5305, -55V, 0,065 Ω

Es stellt sich die Resonanzfrequenz des Ausgangsfilters ein: ca. 61kHz, Auftrennen des Filters ergibt ca. 100kHz. Vermutung: OPV zu langsam

Austausch des OPV durch sehr schnellen BB OPA655: Frequenz ohne Ausgangsfilter ca. 750kHz, Filter 55 μ H/68nF ergibt ca. 270kHz

Vermutung:

Das Prinzip kann nicht korrekt sein, weil immer eine Verzögerung existiert, die mit dem endlichen Gegenkopplungsverhältnis zu einer Ausgangsspannung führt, die nicht ausregelbar ist. D.h. das Ausgangsfilter ist als solches unwirksam und der Ausregel-OPV greift „zu spät“ ein. Der OPA655 regelt schon nach ca. 300 ns, jedoch in Summe mit den weiteren (digitalen) Verzögerungen reicht das, um den Serienresonanzkreis des Ausgangsfilters anzuregen. Vertauschung der Eingänge Comparator führt nicht zum Erfolg, dann Mitkopplung.



Versuch 2, saubererer Aufbau

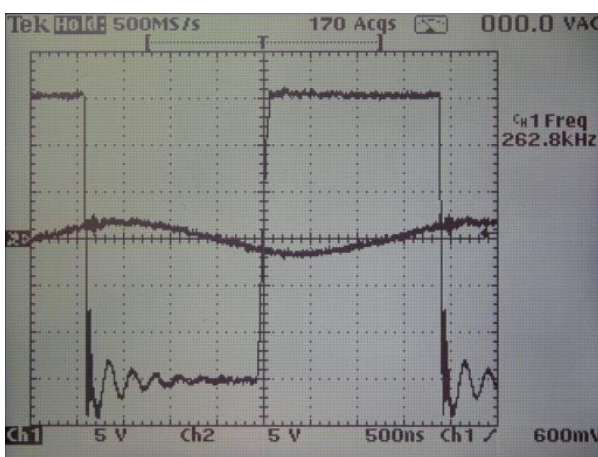


Bild 4: Ausgang vor/nach Filter 55µH/68nF

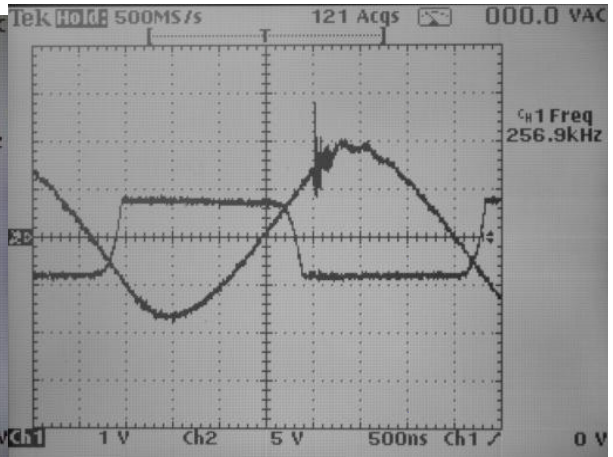


Bild 5: Ausgang nach Filter, Ausgang OPV

Treiberstufe:

Beim Einschalten des unteren n-MOSFET reißt dieser den oberen p-MOSFET durch seine Millerkapazität C_{gd} wieder auf. Hier entsteht shoot-through mit entsprechend erhöhter Verlustleistung. Abhilfe: evtl. stärkere Treiber oder Boosterstufe nach den Treibern (Emitterfolger).(?)

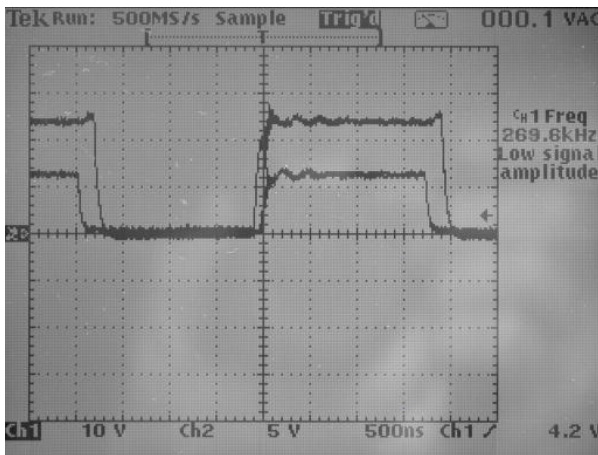


Bild 6: Gatespannungen p-MOSFET/n-MOSFET

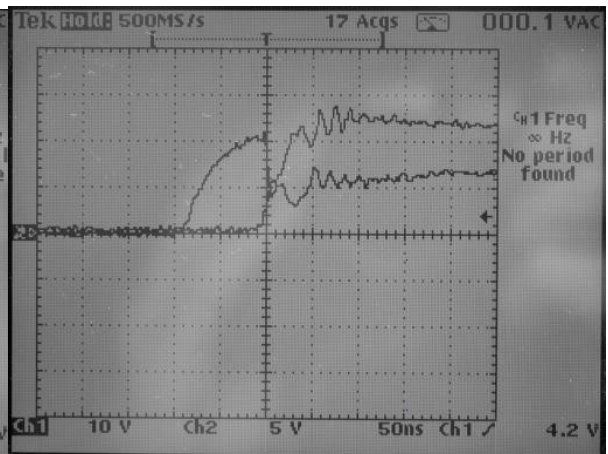


Bild 7: n-MOSFET reißt beim Einschalten p-MOSFET durch seine Millerkapazität auf, dadurch Shoot-through

27.01.2004 (wie Beitrag im Hifi-Forum selben Datums, leicht geändert)

Inzwischen ist der wesentliche Fehler behoben, die Gegenkopplung greift vor dem Filter ab, ich hatte versehentlich nach dem Ausgangsfilter abgegriffen. Den RC-Glieder für die Totzeiteinstellung sollten Komparatoren mit Schaltpunkt in $V_{cc}/2$ folgen (z.B. behelfsweise HC14/AC14, nicht HCT/ACT!), weil sonst die Zeiten asymmetrisch werden. Auf der LP bleibt weiterhin ACT.

Die Treiberprobleme bestehen weiterhin. Gründe sind wohl die Millerkapazität hauptsächlich des (oberen) p-FET und das Ringing in der Totzeitphase, wenn beide FETs ausgeschaltet sein sollen. Der p-FET wird beim Einschalten des n-FET durch die Miller-Kapazität (über welchem die Spannung nicht springen kann) aufgerissen. Die Gate-Source-Spannung des p-FET ergibt sich dynamisch (bei großen dU/dt) also im Wesentlichen aus seiner Drain-Source-Spannung und aus dem Verhältnis C_{gs}/C_{gd} .

Das hat wahrscheinlich auch die FETs gehimmelt, als ich auf +/-25 Volt erhöhte und mit Leistung fuhr. Dabei wurden die FETs extrem heiß.

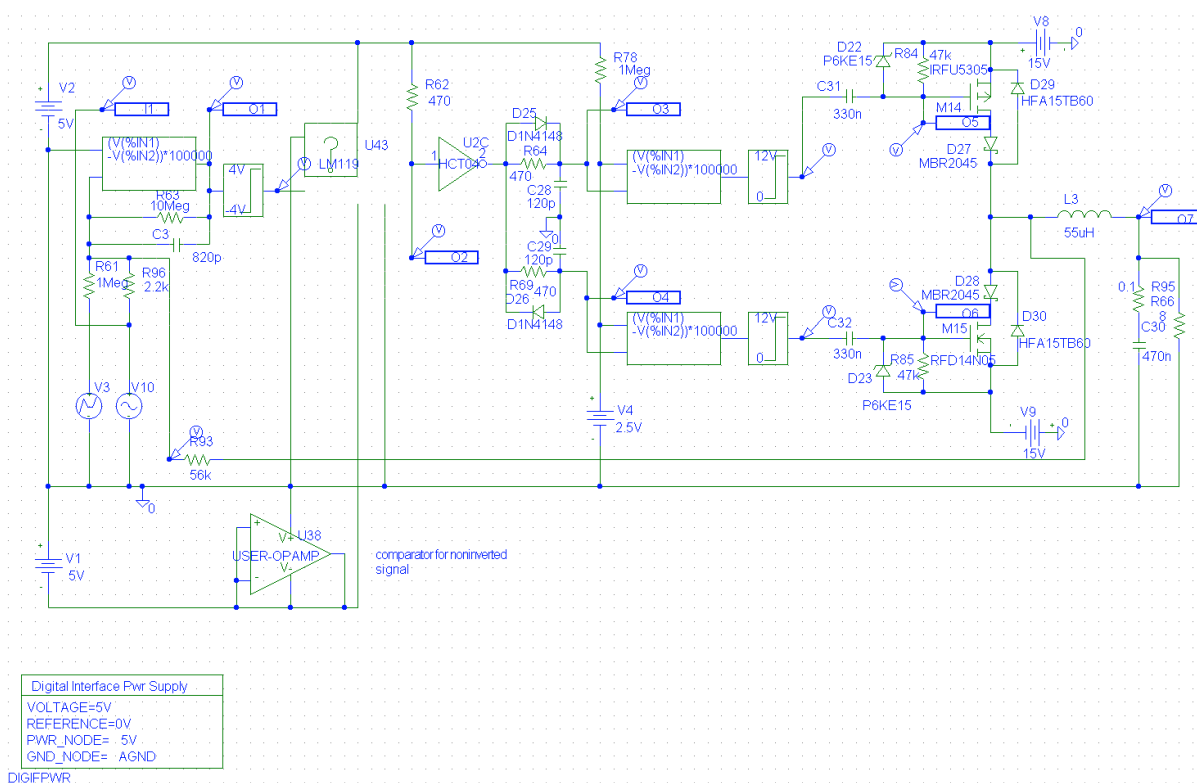
Leerlaufverlustleistung der gesamten Schaltung bei +/-15V ca. 2,5W, Leerlaufrezonanz ca. 620kHz.

Ein erster Versuch mit passiver Zweizeige-Lautsprecherbox (10W/4Ohm) ließ sich hören...

Leichtes Grundrauschen zeugt von nicht gerade perfekter Stabilität (Jitter?) der Schaltfrequenz.

29.01.2004

Schaltung wegen fehlender Bibliothek unvollständig – wird nachgereicht



- Ausgangsstufe repariert (MOSFETs gewechselt)
- Nach Hinweis von TBukt (Hifi-Forum) Schottkydioden in Drainzuleitungen eingeführt (zum Abschalten der internen parasitären BJTs) und HexFREDs eingefügt
- Zener an Gates durch Supressordioden P6KE15A ersetzt
- Koppel-C zwischen Treibern und Gates geändert: $470n\ X7R \parallel 10n\ X7R \parallel 330p\ C0G$, wegen des günstigeren Impedanzverlaufes bei hohen Frequenzen (steile Flanken)
- Gegenkopplungsleitung unter die LP verlegt (Entstörung)

Ergebnis:

Das Ausgangssignal (ca. 660kHz) vor dem Filter sieht etwas „weicher“ aus, weniger Ringing und nur in der Low-Phase. Nach dem Filter sind die Schaltspitzen zu sehen <500mV, kann auch Noise-Pickup der Oszi-Massekabel sein.

Der Einbruch der Gatespannung des p-FET ist jetzt geringer, ca. 4V. Er tritt vor und nach dem Koppel-C identisch auf, also ist dessen Größe nicht zu niedrig, eher ist der Innenwiderstand des Treibers zu hoch.

IBTK[®] Dipl.-Ing. Timo Kirschke
Roßmäßlerstraße 15, 01705 Freital
Tel/Fax: 0351-46006-20/-21
Email: timo.kirschke@ibt.de,
Internet: <http://www.ibt.de>

Problem:

Starker Frequenzjitter im Leerlauf, berührt man die Drainstrecke der FETs, ist das Signal jedoch stabil. Dabei steigt die Frequenz etwas. Dazu reicht auch eine 10cm lange „Antenne“ (kapazitive Last?). Ein RC-Glied von dem Punkt zwischen den Schottkies nach Masse (120Ohm, 1W+1nF in Reihe) beruhigt das Signal, wenn man nicht in die Nähe kommt – also keine endgültige Lösung.

Dabei bleibt das Signal nach dem Filter ruhig.

Die Stromaufnahme ist etwas geringer: +170/-100mA, bei Jitter etwa 20mA höher.

Die MOSFETs werden im Leerlauf nur handwarm.