

Warum braucht eine 12V PA mit einem Röhrentrafo eine bifilare Spisedrossel?

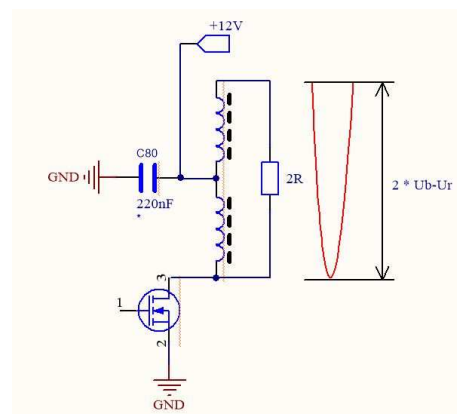
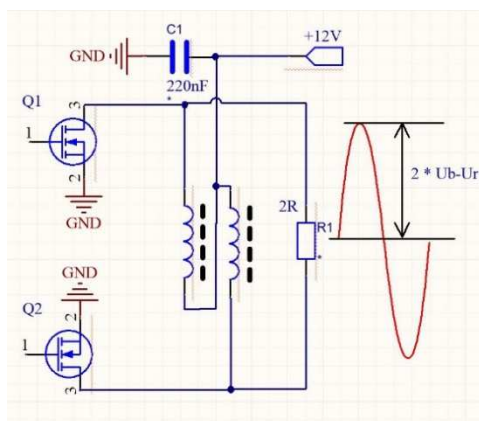
Die nachfolgenden Betrachtungen gelten für 12V PAs im AB-Betrieb und Ausgangsübertrager mit nur einer primären Windung.

Es existiert eine Reihe von Veröffentlichungen von 12V Endstufen, die einen speziellen Ausgangsübertrager, bestehend aus zwei primären, von Ferritmaterial umgebenen Röhren, verwenden. Wie man leicht erkennen kann, besteht zwischen diesen Röhren auf Grund der mechanischen Trennung keine magnetische Kopplung. Dieser Umstand wurde von den Autoren offenbar nicht erkannt und berücksichtigt. Leider betrifft das auch professionelle Entwickler und Hersteller von HF-Leistungstransistoren, z.B. Mitsubishi.



Die fehlende Kopplung gilt überraschenderweise auch für einen Doppellochkern. Die in den beiden Bohrungen befindlichen Wicklungsteile weisen keine oder nur sehr geringe magnetische Kopplung auf. Das lässt sich durch Bestimmung der Streuinduktivität zwischen zwei, um die Außenstege gewickelten Spulen, leicht feststellen.

Für die saubere Funktion einer Gegentaktstufe ist diese Kopplung aber unerlässlich. Zum besseren Verständnis wird die nachstehende Stufe als Gedankenexperiment ohne Transformation nach 50 Ohm betrachtet. Links Gegentakt, rechts reduzierte Zeichnung nur für eine Halbwelle.



Der Lastwiderstand von 2 Ohm, gemäß der gewünschten Leistung von 100 W, wird direkt an die Drains angeschlossen. Q1 und Q2 werden wechselseitig angesteuert. Wird einer der beiden Transistoren leitend, fließt durch die Wicklungshälfte der Drossel ein Strom und die Drainspannung sinkt bis zur Restspannung ab. Für den Aufbau einer Halbwelle und den durch die Last fließenden Strom muss aber die andere Wicklungshälfte der Drossel ebenso einen Strom liefern können, dort muss die Drainspannung ansteigen. Da der zugehörige Transistor aber sperrt, ist das **nur auf dem Weg der magnetischen Kopplung zwischen den beiden Teilwicklungen** erreichbar. Die Funktionsweise der bifilaren Drossel ist auch als mittenangezapfter Autotrafo, der pro Halbwelle eine

Spannungstransformation um den Faktor 2 bewirkt, erklärbar, obiges Bild rechts. Genau so arbeiten alle Röhrenendstufen im NF-Bereich.

Zwischen den Drains ergibt sich eine Spitzen-Spitzen-Spannung von der vierfachen Betriebsspannung abzüglich Restspannung. Bei 12 V sind das also ca. 40 V_{ss}. Das entspricht einer Effektivspannung von ca. 14 V_{eff}, diese Spannung bewirkt einen Strom durch die 2 Ohm-Last von 7 A_{eff}. Multipliziert, ergibt das die gewünschte Leistung von ca. 100 W. Wird der Ausgangsrafo angeschlossen und die Spannung um den Faktor 5 hochtransformiert, ergeben sich am Ausgang analog ca. 70 V_{eff}, das entspricht den 100 W an 50 Ohm.

Ohne die Verdopplung der Betriebsspannung durch die Transformation der Speisedrossel bei jeder Halbwelle wäre diese Ausgangsleistung nicht erreichbar.

Man sollte also bei einem derartigen Gegentaktverstärker die Funktion der bifilaren Speisedrossel und des Ausgangsrafos trennen. Die Drossel sorgt für die Zuführung der Betriebsspannung und die Transformation nach dem Gegentaktprinzip, der Ausgangsrafo liefert einen, für die Strombelastung der Transistoren (und natürlich auch der Drossel) geeigneten Lastwiderstand.

Daraus folgt, der Verstärker arbeitet auch mit höheren Lastwiderständen bis zum Leerlauf völlig unproblematisch, es fließt nur weniger Strom und die Ausgangsleistung reduziert sich.

Aus der Trafoübersetzung und der Betriebsspannung ergibt sich auch die maximal erzeugbare, noch lineare Ausgangsleistung.

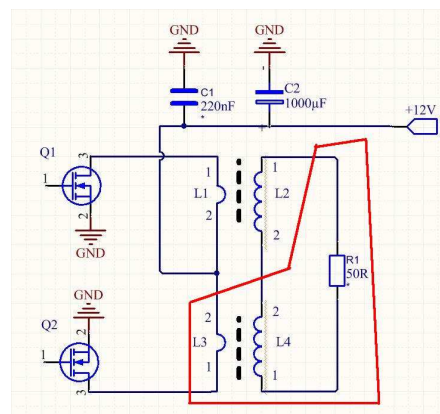
Zwischen den Drains kann nicht mehr Spannung entstehen als die vierfache Betriebsspannung abzüglich der Sättigung. Diese Spannung wird dann auf den durch die Trafoübersetzung festgelegten Wert transformiert und erzeugt an 50 Ohm die entsprechende Leistung.

Höhere Leistungsausbeuten sind bei extremer Übersteuerung eines solchen Verstärkers möglich, die Drainspannungsverläufe werden dann rechteckförmig und die Grundwelle wird nach Fourier um den Faktor $4/\pi$ höher als die Rechteckamplitude.

Verwendet man also einen Aufbau mit einem magnetisch nicht gekoppelten Röhrentrafo, und verzichtet auf die Speisedrossel, ist eine saubere Arbeitsweise einer solchen PA nicht gegeben.

Wie man aus nachstehender Schaltung erkennt, muss man dann von zwei Transformatoren ausgehen.

Weiterhin wird deutlich, dass die Lastverhältnisse nicht eindeutig sind.

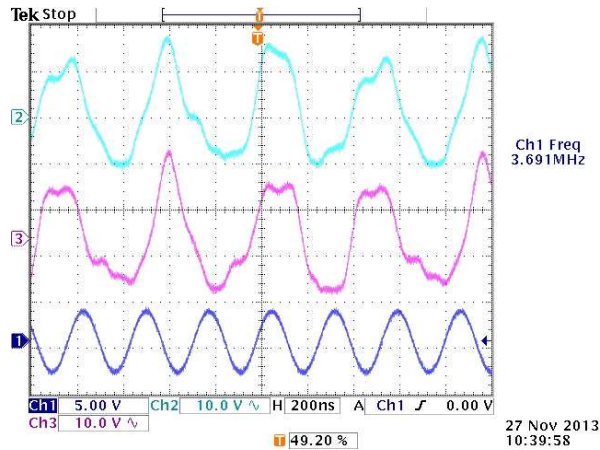


Die während einer Halbwelle wirkende Last besteht z.B. aus R1 in Reihe mit L4.

Warum funktioniert nun eine solche Stufe trotzdem, wenn auch mit eingeschränkten Parametern?

Der Hauptgrund ist die zwingend immer vorhandene, extrem niederohmige Gegenkopplung auf die Gates der Transistoren, teilweise mit Widerständen herab bis zu 50 Ohm. Dabei wird für das erforderliche „Glattbügeln“ der Drainspannungen unnötigerweise viel Verlustleistung erzeugt.

Wird diese Gegenkopplung testweise entfernt, ergeben sich völlig irreguläre Verläufe der Drainspannungen, wie das nachstehende Oszillogramm zeigt.



Ein Zusammenhang zwischen der Ansteuerspannung (blau) und den beiden Drainspannungen ist bei entfernter Gegenkopplung nicht mehr erkennbar. Es muss um die Spannungsfestigkeit der Transistoren gefürchtet werden.

Zusätzlich sind meist an den Drainanschlüssen große Kondensatoren nach Masse angebracht, für die es keinen Grund gibt.

Darüber hinaus bewirkt die Sekundärwicklung des Trafos zusätzlich eine parasitäre Verkopplung der beiden Primärwicklungshälften, das hat aber mit einer korrekten Funktion des Gegentakprinzips nichts gemein.

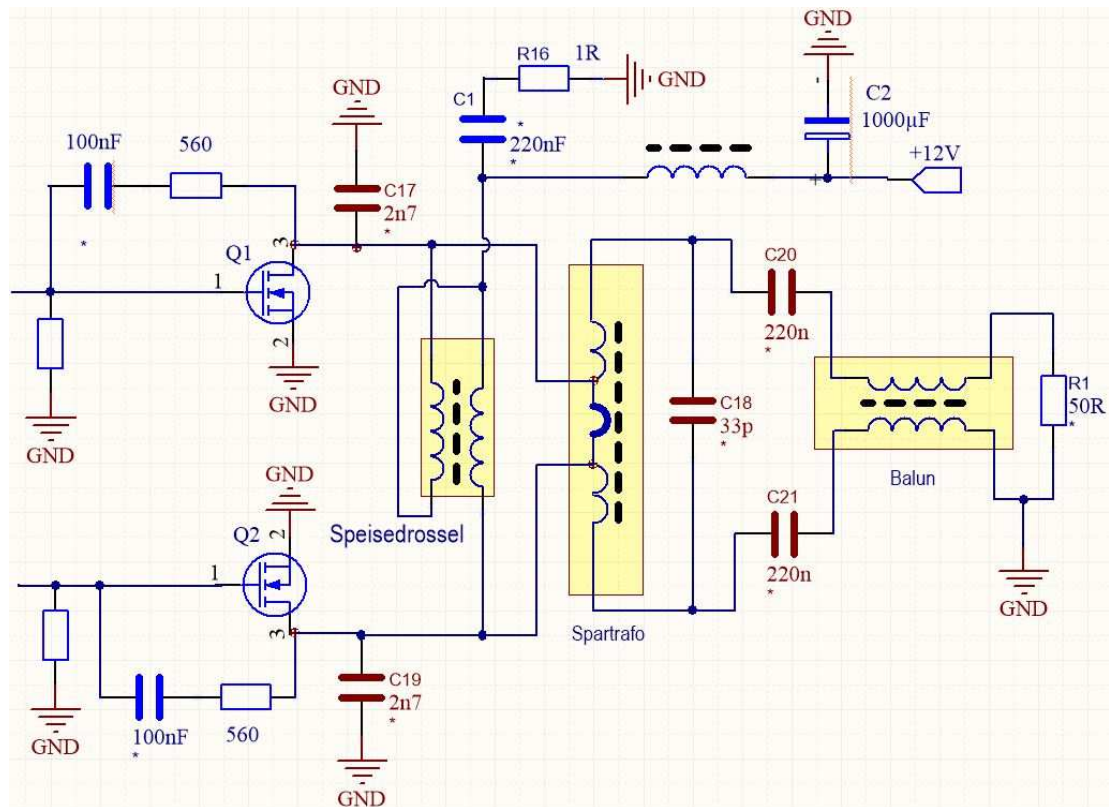
Wie sich an zwei Exemplaren einer Endstufe mit Mitsubishi-Transistoren RD100HHF1 zeigen ließ, weist die Ausführung mit einer zusätzlichen bifilaren Speisedrossel bei wichtigen Parametern bessere Ergebnisse auf. Die Leistungsverstärkung stieg von 13 auf 16 dB, bei 100 W PEP lassen sich 40 dBc IMD3 erreichen und der Wirkungsgrad ist deutlich besser. Die Gegenkopplung, welche testweise entfernt wurde, hat auf das Intermodulationsverhalten nur geringen Einfluss, wohl aber der Ruhestrom.

Ein Verstärker mit korrektem Gegentakprinzip arbeitet auch völlig ohne Gegenkopplung stabil. Diese kann ggf. zur Korrektur des Frequenzgangs herangezogen werden, der Gegenkopplungsgrad wird aber wesentlich geringer.

Bei kritischer Betrachtung des normalen Ausgangsrafos ergibt sich bei einer Ausführung mit 5 Sekundärwindungen keine ausreichende Breitbandigkeit bis 30 MHz. Transformationsversuche am Netzwerkanalysator zeigen bei 30 MHz keine ausreichende Transformation von 50 Ohm nach 2 Ohm.

Als Lösung wurde daher ein Spartrafo mit insgesamt 5 Windungen gewählt, wobei die eine, in der Mitte liegende Windung, weiterhin aus den beiden Röhrenchen gebildet wird und um jeweils 2 Windungen ergänzt wird.

Nachteilig ist, dass die Anschlüsse des Übertragers dann alle auf einer Seite sind. Das kann man als Vorteil nutzen, indem der Ausgangsbalun mechanisch auf den Spartrafo montiert wird.



Die Teilschaltung der 12V PA zeigt obiges Bild. Die hier noch eingezeichnete Gegenkopplung kann entfallen, bzw. für eine mögliche Korrektur des Frequenzgangs wesentlich hochohmiger ausgeführt werden. C17 bis C19 sind die Kompensationskondensatoren für die Streuinduktivität des Ausgangsrafs. S11 des Trafos lässt sich „rückwärts“ in die Endstufe hinein messen, wenn zwischen die Drains ein 2 Ohm Widerstand geschaltet wird.

Der zusätzliche Aufwand für eine Symmetrierung ergibt in Verbindung mit dem Spartrafo bis 30 MHz volle Ausgangsleistung.

DL5CN, 29.4.2015