Moderner UHF-Röhrenleistungsverstärker mit der GI 7 b/t

WOLFGANG BORSCHEL – DK2DO

Die neue EMVU-Richtlinie stellt strenge Anforderungen an die in den Exponierungsbereichen erzeugte Feldstärke. Ein alternativer Ansatz konzentriert sich auf Portabelbetrieb von Contest- oder DX-Standorten „auf freiem Feld" und damit auf die Masse des Verstärkers. Trotzdem sollte er eine angemessene Leistung erzeugen können.
Der beschriebene 70-cm-Verstärker liefert bei einer Masse von 10,5 kg über 300 W Ausgangsleistung.

Gerade Superleistungsendstufen auf den höherfrequenten Bändern sind EMV-mäßig in Verruf geraten. Die neuen Vorgaben zwingen zum Umdenken in Konstruktion, Aufbau und Betrieb von HF-Leistungsverstärkern, damit man sie bequem portabel betreiben kann. Die vorgestellte Endstufe hat betriebsbereit eine „spezifische Masse" von 31,4 W/kg (bezogen auf die Ausgangsleistung); ein Wert, den auch Halbleiterendstufen kaum erreichen.
Die Überlegungen zur Konstruktion wurden in einem Vortrag anläßlich der jüngsten UKW-Tagung in Weinheim bei großer Resonanz dargestellt. Dieser Beitrag soll lediglich eine Beschreibung des theoretischen und praktischen Ausführungsweges darstellen, der zum Fertiggerät führen kann, aber kein Nachbaurezept sein.

■ Konstruktion per Simulations-Software

Um Objekte zu optimieren, bedient man sich heute Simulations-Software, die eine Bestimmung und Dimensionierung von Bauteilen erleichtert. Damit kann man zudem bereits auf dem Monitor erkennen, wie sich die noch gar nicht aufgebaute Linear-Endstufe später verhalten wird; eine spannende Erfahrung für jeden Selbstbauer. Hier soll es aber weniger um den Umgang mit Simulations-Software gehen, als vielmehr um den Weg zur Optimierung. Die am Fertiggerät vorgenommenen Messungen wurden mit den Ergebnissen der Simulation verglichen und stimmten überein.

■ Einige Konstruktionsprämissen

Für einen professionellen Konstrukteur zählt ein Leistungsverstärker mit einer GI 7b/t zu den Kleinleistungsverstärkern. Es verbietet sich deshalb, Topfkreise mit zwei Lüftern aufzubauen. Auch Luftschläuche im Geräteinnern kommen nicht in Frage, weil der durch sie entstehende Druckabfall enorm wäre. Des weiteren sollte man nicht mit einer Spannungsverdopplung im Netzteil liebäugeln; die hohen Ladekapazitäten würden nur zu hohen Spitzeneinschaltströmen führen und damit eine Einschalt-Verzögerungschaltung als Zusatzmodul erfordern. Ein leistungsgerecht eingesetzter Netztransformator hält die Einschaltströme auf einem Niveau, das die Sicherungen noch verkraften. Hingegen kommt man ohne hochwertige Koaxialrelais nicht aus.
Die Röhre hat eine stattliche Größe und bereits eine Masse von 300 g. Ihr Kühlkopf ist abschraubbar. Da man sie in den Resonanztopf hineinbauen muß, läßt das für die äußeren Topfkreismaße wenig Spielraum. Ich habe einen Kasten von 115 mm × 115 mm festgelegt.
Die Software dimensioniert dann das Innenleben, als da sind: Resonatorlänge, Resonatorbreite, Abstimmkapazität, Kreisgüte und Auskoppelkapazität beim Leistungsoptimum. Die einzelnen Schritte sollen in der vorliegenden Beschreibung vom Leser nachvollziehbar sein.

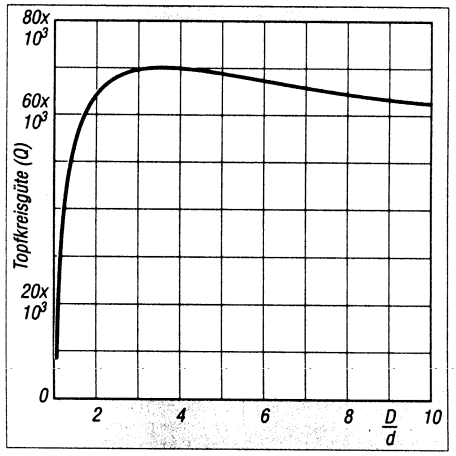


Bild 1: Topfkreisgüte als Funktion des Verhältnisses Außenleiterdurchmesser zu Innenleiterdurchmesser D/d, s. Bild 2

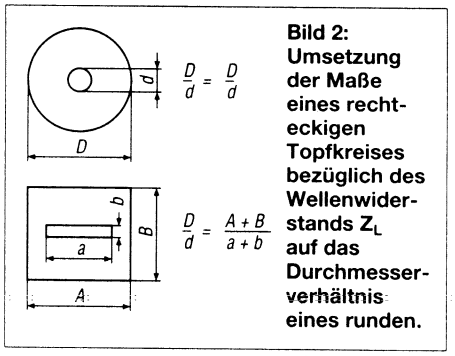


Bild 2: Umsetzung der Maße eines rechteckigen Topfkreises bezüglich des Wellenwiderstands Z_L auf das Durchmesserverhältnis eines runden.

■ Topfkreisdimensionierung

Für die festgelegten Außenmaße gibt der Funktionsplotter der Simulations-Software zunächst die zu erwartende maximale Kreisgüte wieder (Bild 1). Dabei handelt es sich um die Leerlaufgüte eines nicht kapazitiv belasteten Topfkreises, wie er in der Praxis allerdings nicht vorkommt. Die Skalierungsachse D/d zeigt, daß die Kreisgüte ein Optimum bei D/d = 3,64 aufweist; eine wichtige Erkenntnis, denn daraus bestimmen sich der Innenleiter und der Wellenwiderstand des Systems. Die Kreisgüte selbst spielt zunächst eine untergeordnete Rolle. Sie wäre selbst dann noch als gut zu bezeichnen, wenn sie in der Praxis nur die Hälfte des Maximalwerts erreicht – wohl wissend, daß der Topf aus Aluminium besteht, sich deshalb auch nicht versilbern läßt und der Kreis erheblich kapazitiv belastet werden muß. Aus dem im Optimum abgelesenen Wert für D/d = 3,64 und ε_r = 1,00064 für Luft von 40 °C läßt sich mit

$$Z_L = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon_r}} \lg \frac{D}{d}$$

der zugehörige Topfkreis-Wellenwiderstand zu 77 Ω ermitteln. Diesen Widerstand weist die Physik als optimalen Systemwert aus. In diesem Fall ist die Kreisgüte am höchsten, der Resonanzwiderstand am größten, und auch die auskoppelbare Leistung erreicht ein Maximum. Die notwendig werdende kapazitive Belastung des Kreises drückt zwar die Kreisgüte erheblich, verschiebt aber das Maximum nicht.
Um den Topfkreis im Selbstbau wirtschaftlich anzufertigen, muß die Anodenresonanzkammer kastenförmig sein. Aus dem

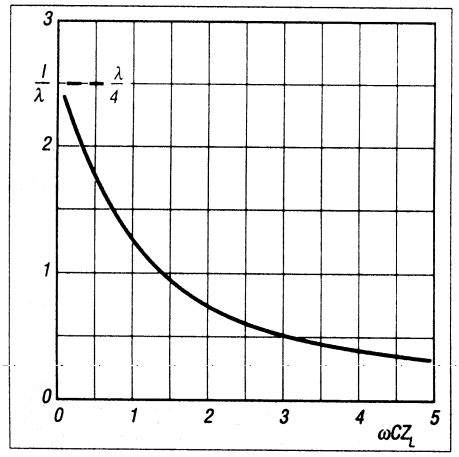


Bild 3: Topfkreislänge als Funktion Abhängigkeit der Abstimmkapazität, jeweils normiert. Z_L ist der Wellenwiderstand des Resonanzsystems, C die Last- (Abstimm-)kapazität. Das Produkt $\omega C \cdot Z_L$ ist ohne Dimension.

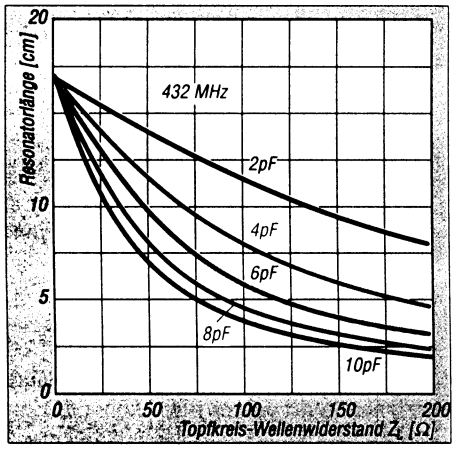


Bild 4: Resonatorlänge eines Topfkreises für das 70-cm-Band als Funktion des Topfkreis-Wellenwiderstandes. Parameter: Last-(Abstimm-)kapazität

in Bild 2 angegebenen Formalismus und der Erkenntnis, daß der optimale Z_L-Wert 77 Ω beträgt, ergibt sich ein 62 mm breiter Innenleiter aus 2-mm-Aluminiumblech. Mag es nun Zufall sein oder gewollt, daß der Anodenkühlkopf der GI 7b/t eben diese 62 mm Durchmesser besitzt; es erleichtert den Aufbau. Nachdem aus dem Kennlinienfeld der GI 7b/t der Innenwiderstand (nach Arbeitspunktfestlegung) bestimmt ist, ermittelt die Simulations-Software aus dem Ersatzstromlaufplan die optimale Auskoppelkapaität. In der Selbstbaupraxis ist diese Kapazität als Auskoppelfahne ausgeführt. Der Selbstbauer hat diese Auskoppelfahne früher so lange verbiegen müssen, bis die Leistung ein Optimum ergab, weil man den optimalen Wert der Auskoppelkapazität nicht kannte.

■ Ermittlung der Resonatorlänge

Die Resonatorlänge ist abhängig von der kapazitiven Last. Da sich die Endstufe im Bereich von 430 bis 440 MHz auf Resonanz abstimmen lassen soll, kann man auf eine Abstimmkapazität nicht verzichten. Bild 3 gibt die normierten Werte für alle Wellenleitersysteme an. Aus Bild 4 läßt sich die Resonatorlänge für das 70-cm-Band unmittelbar in mm ablesen.

Abstimmkapazitäten zwischen 0,5 und 6 pF sind leicht realisierbar. Zu berücksichtigen ist dabei, daß sich zur Lastkapazität noch

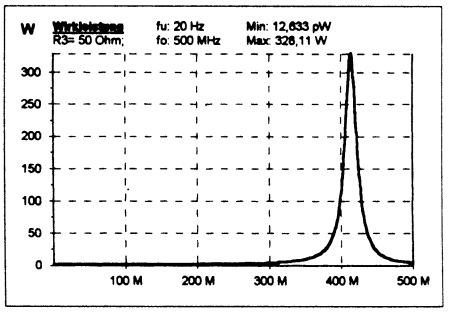


Bild 5: Ausgangsleistung als Funktion der Frequenz für 2 pF Auskoppelkapazität. Bei niedrigerer oder höherer Kapazität verringert sich jeweils die Leistung, während bei geringer Kapazität die Bandbreite sinkt und bei höherer steigt, wobei sich in letzterem Fall zusätzlich die Resonanzfrequenz erniedrigt und die Kurve verbreitert (geringere Güte).

die innere Röhrenkapazität addiert. In der Regel liegen aber die inneren Kapazitäten der Mikrowellenröhren bei allen Typen deutlich unter 1 pF, so daß sie keine gravierende Rolle spielen.

Bei einem mittleren Wert von 2 pF und bei dem dimensionierten optimalen Wellenwiderstand des Resonanzsystems von 77 Ω

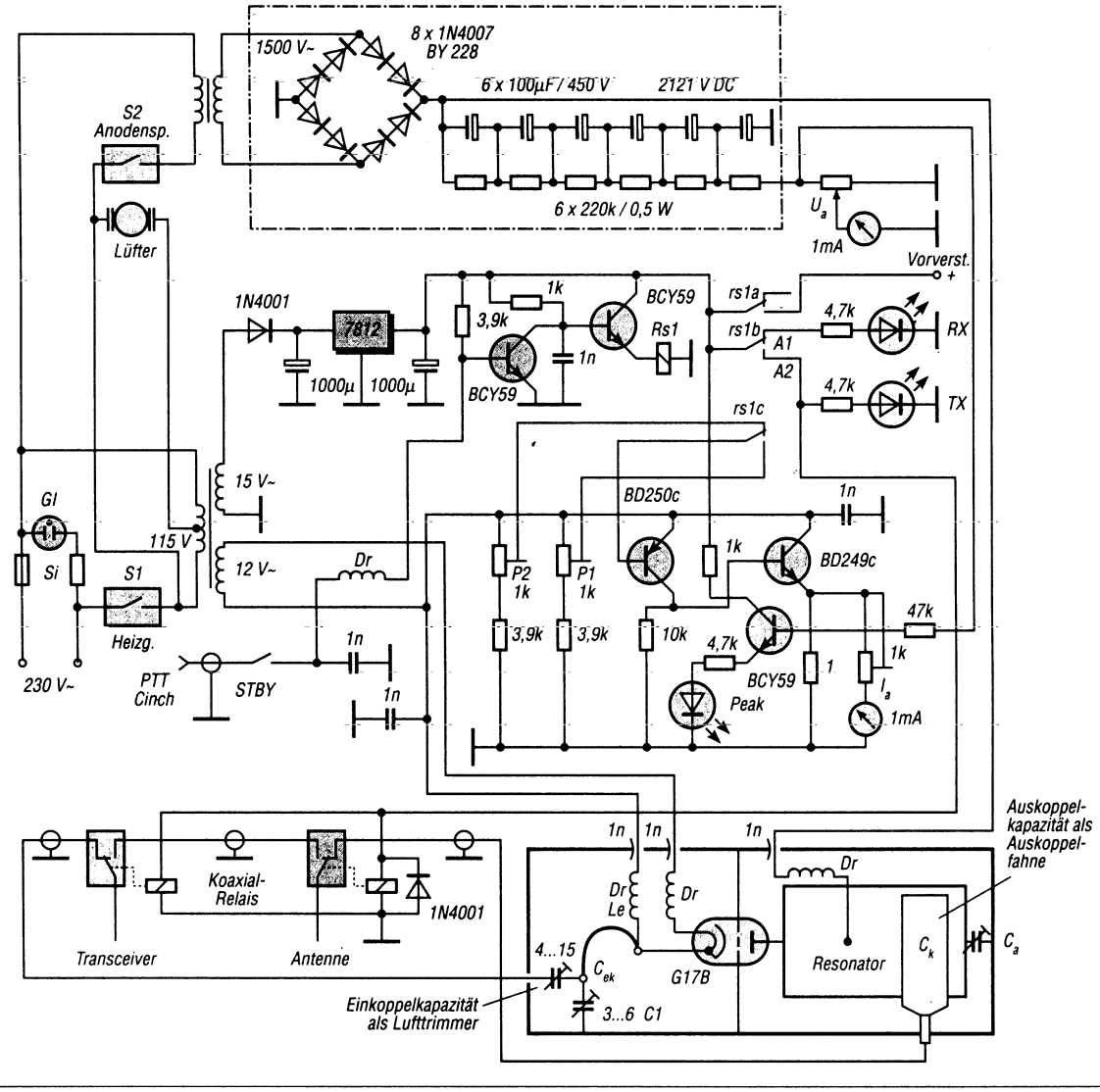


Bild 6: Stromlaufplan der 70-cm-Endstufe. Mit P1 wird der Vorwärm-, mit P2 der Ruhestrom im Sendebetrieb eingestellt. Die beiden Instrumente für Anodenstrom und -spannung wurden beim Mustergerät durch einen Umschalter ersetzt. Die Drosseln sind sämtlich sog. λ/4-Drosseln, also 170 mm Draht zu einer freitragenden Spule gewickelt, L_e s. Text. Der Abstimmkondensator C_a wird ähnlich wie der Auskoppelkondensator C_k durch einen per Spindel verstellbaren Blechstreifen realisiert.

erhält man eine Resonatorlänge von 130 mm. Eine andere Überlegung ist, den unteren Bandbereich (432,0 MHz) bei voll eingedrehter Abstimmkapazität zu erreichen. In diesem Fall würde die Resonatorlänge bei 6 pF und 77 Ω Wellenwiderstand 90 mm betragen. Der Abstimmbereich ist in jedem Fall hinreichend groß.

Bei der Festlegung der Kapazität der Auskoppelfahne stellt die Simulation dar, welche Ausgangsleistung zu erwarten ist. Mehrere Diagramme für verschiedene Auskoppelkapazitäten (Bild 5 als Beispiel für das Optimum) zeigen, daß etwas unterhalb von 2 pF ein Leistungsmaximum von etwa 328 W verfügbar ist (Parameter: Vollaussteuerung, 2 kV Anodenspannung, R_i beim Arbeitspunkt 2,7 kΩ). Bei überkritischer Auskopplung geht nicht nur die Ausgangsleistung zurück, sondern es verschiebt sich noch der Resonanzpunkt zu niedrigeren Frequenzen, und die Kreisgüte verringert sich.

Bei der ermittelten Ausgangsleistung und einem unterstellten Wirkungsgrad von 50% ist eine Netzeingangsleistung von 650 VA zu erwarten. Der Hochspannungstransformator mit einem 750-VA-Kern bietet eine Reserve von 100 VA, hat eine Masse von 3,4 kg und ist handelsüblich erwerbbar.

■ Stromlaufplan

In der Praxis wird selbstverständlich nicht nur das Auskoppelnetzwerk des Verstärkers softwaremäßig optimiert, sondern auch das Einkoppelnetzwerk.

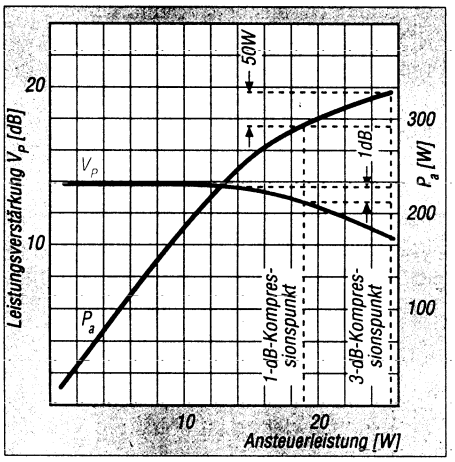


Bild 7: Grundsätzliches Aussteuerungsverhalten der Trioden-Gitterbasisschaltung

Die Endstufe ist unkompliziert und nachbausicher. Hochspannungsnetzteil und Steuerteil sind auf zwei Leiterplatten untergebracht.

Zwei Transistoren BCY 59 verstärken den PTT-Schaltstrom (3 mA bei Kurzschluß an der PTT-Buchse) für das PTT-Relais Rs1. Eine Drossel (170 mm CuL-Draht, auf einen Dorn gewickelt) am PTT-Eingang verhindert, daß HF eindringt. Die Kontakte des PTT-Relais schalten einmal die beiden Koaxialrelais und gleichzeitig zwischen Ruhestrom und Vorwärmstrom der Röhre um.

Die ebenfalls über das Relais geschalteten Leuchtdioden TX (oder transmit; TRM) sowie RX (receive; RVE) signalisieren an der Frontplatte den Schaltzustand. Außerdem steht eine über den Relaiskontakt rs1a geschaltete Betriebsspannung für einen Mast-Empfangsvorverstärker zur Verfügung. Die Kontrollschaltung mit der Peak-Leuchtdiode zeigt schließlich noch den Belastungszustand des Hochspannungsnetzteils und dabei auch das Vorhandensein der Hochspannung an.

In der Praxis wurde entgegen Bild 6 nur ein Meßinstrument auf der Frontplatte verwendet; zur Umschaltung zwischen I_a- und U_a-Anzeige dient ein kleiner Schalter. Bei späteren Nachbauexemplaren habe ich auf die Messung der Hochspannung ganz verzichtet. Statt dessen wurde bei der Leistungsauskopplung hinter den Anodentopf ein Meßkoppler vorgesehen, über den das Frontplatteninstrument die relative Ausgangsleistung anzeigt.

Der Operator bestimmt die Vorheizzeit, indem er die Hochspannung individuell zuschaltet. Er sollte dabei die Mindestvorheizzeit von 1 min berücksichtigen. Hört er bei ausgeschalteter Endstufe eine DX-Station, kann er die Vorheizzeit beenden, wenn die DX-Station den CQ-Ruf abschließt. Röhren wie die GI 7b sind robust und vertragen auch einmal kurze Vorheizzeiten.

Als Katodenstromschaltung hat sich die hier eingesetzte Version mit den Komplementärtransistoren BD 249/250 gut bewährt. Im Standby-Betrieb schaltet das Relais von Ruhestrom auf Vorwärmstrom um, denn es hat sich als zweckmäßig erwiesen, den Anodenstrom nicht ganz auf Null zu schalten. Die Endstufe muß deshalb im Gegensatz zu einer Tetrode trotzdem nicht neutralisiert werden.

Das Eingangsnetzwerk im Katodenkasten ist als herkömmliches Collinsfilter aufgebaut, wenn es auch auf den ersten Blick nicht als solches erkennbar ist. Als zweite Ableitkapazität wirkt die Gitter/Katoden-Kapazität, im Datenblatt mit 12 pF angegeben. Da sie unveränderlich ist, kann man den Collinskreis ausschließlich mit C1 abgleichen. Wer schon einmal Anodenresonanztöpfe aufgebaut hat, weiß, daß die kritischen Punkte des Abgleichs die Einkoppelkapazität und die Auskoppelkapazität sind. Den richtigen Wert zu finden, sollte diesmal nicht dem Fingerspitzengefühl überlassen, sondern, wie bei den anderen Werten, mittels Simulationssoftware optimiert werden. Die Drahtschleife im Collinsfilter (30 nH) besteht aus 50 mm CuAg-Draht. Sie ist mit einem oberen Biegeradius von etwa 10 mm länglich gebogen.

Das Eingangsnetzwerk soll selektiv wirken, im Resonanzbereich möglichst wenig Dämpfung besitzen und gleichzeitig den Transceiver-Ausgangswiderstand von 50 Ω auf den Röhreneingangswiderstand von 200 Ω anpassen. Die Simulation zeigt, daß der Eingangswiderstand bei Resonanz (432 MHz) nie rein real sein kann.

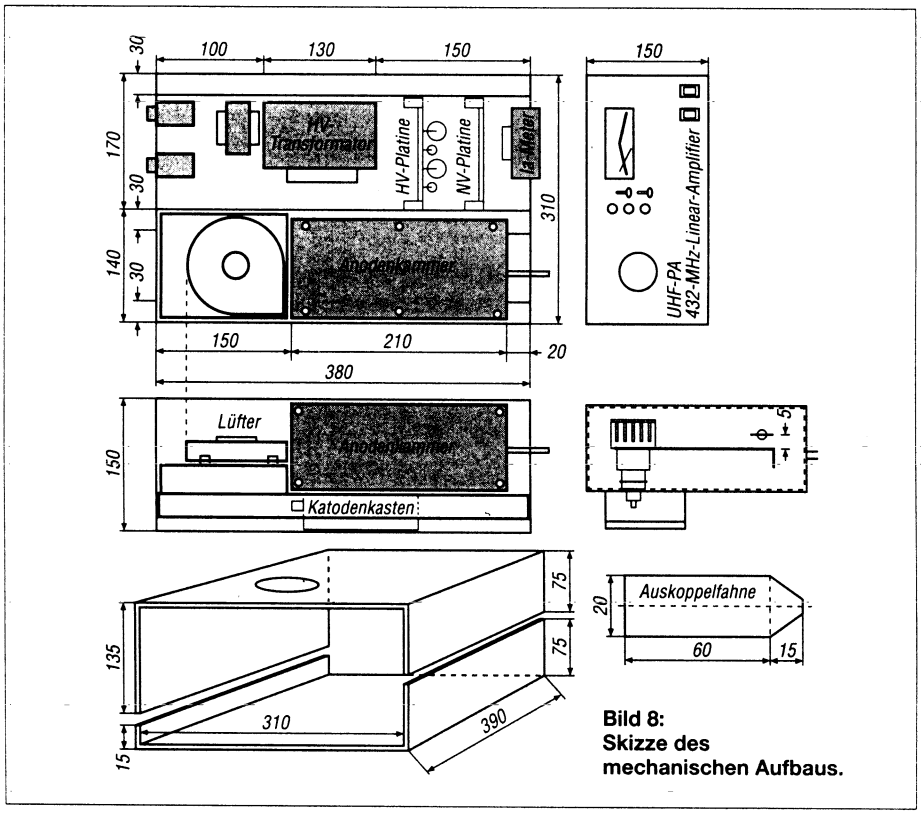


Bild 8: Skizze des mechanischen Aufbaus.

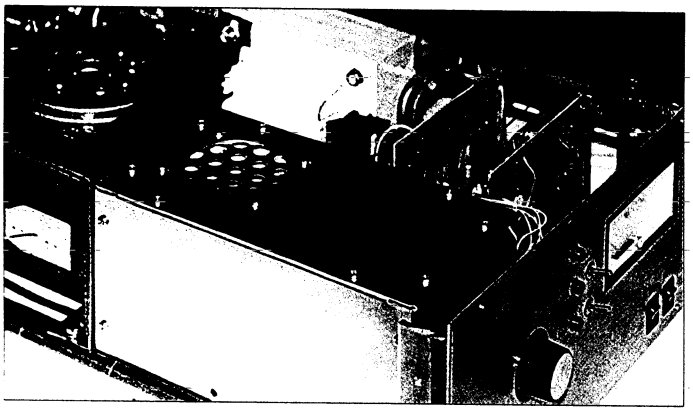


Bild 9: Ansicht von vorn/oben. Zu sehen links der Lüfter, vorn der Endstufentopf, dahinter der Hochspannungstransformator, rechts daneben die Leiterplatten für die Hochspannungsgleichrichtung und die Steuerung

Die Einfügungsdämpfung im Resonanzbereich ließ sich zu 0,1 dB ablesen. Die 3-dB-Einkoppelbandbreite beträgt etwa 10 MHz, so daß die Eingangskreise bei Frequenzänderung keine Nachstimmung erfordern. Die nachzuweisenden Blindanteile sind zwar unproblematisch, für den Steuertransceiver aber nicht wünschenswert. Sie lassen sich allerdings auch bei noch so geduldigem Abgleichen und Nachstimmen nicht eliminieren. Eine induktive Einkopplung brachte in der Simulation eher eine Verschlechterung als Verbesserung. Ein neues Einkoppelnetzwerk ist in Entwicklung.

Mechanik

Bild 8 zeigt eine Skizze des mechanischen Aufbaus. Die Gehäuseschalen wurden aus 2-mm-Aluminiumblech gebogen. Die Querstege bestehen aus abgewinkeltem 5-mm-Aluminium. Auf angepaßt gebogene Profile kann nicht verzichtet werden; Netzteil und Resonanztopf müssen eine stabile Einheit bilden. Die Röhrenfassung wurde als Preßteil entworfen und eine spezielle Tiefziehvorrichtung dafür gebaut; damit ist sie mit einem Minimum an Aufwand herstellbar.

Um den Leitungsresonator im Topfkreis abstimmbar zu machen, ist er am offenen Ende kapazitiv belastet. Dazu wird die Aluminium-Streifenleitung abgewinkelt und ein auf Masse geschraubtes Messingblech als Gegenkondensatorplatte über eine Gewindestange variiert. Die etwa 75 mm lange Stange dreht man per Drehknopf von Frontplatte aus und bringt so den Topfkreis in Resonanz. Ein Streifen Teflonfolie zwischen den beiden Kondensatorplatten (abgewinkelte Anodenleitung und auf Masse geschraubtes Messingblech) sorgt dafür, daß sie beim Abstimmen auf keinen Fall in Berührung kommen. Die Teflonfolie bewirkt zudem eine zusätzliche Spannungsfestigkeit.

Inbetriebnahme

Es empfiehlt sich, nach dem Aufbau alle Module nacheinander einzeln in Betrieb zu nehmen. Zum ersten Vorheizen der Röhre sollte man mindestens 5 min aufwenden, weil ja nicht bekannt ist, wann die Röhre das letzte Mal aufgeheizt wurde.

Beim Zuschalten der Hochspannung sorge man außerdem dafür, daß Ruhe- und Vorwärmstromsteller auf Emitterpotential des BD 250 gestellt sind. Der Ruhestrom wird danach allmählich gesteigert.

Bei 2 kV Anodenspannung und 40 mA Ruhestrom beträgt der dynamische Innenwiderstand etwa 4 kΩ; bei 110 mA sinkt er auf ungefähr 1,9 kΩ. Die Simulation hat 2,7 kΩ zugrundegelegt, was etwa einem Ruhestrom von 60 mA entspricht. Bei diesem Ruhestrom muß die simulierte Ausgangsleistung erreicht werden. Ein angeschlossenes Wattmeter bestätigt das. Die Ansteuerleistung beträgt dabei 24 W, die Leistungsverstärkung wird 11,3 dB.

Leistungsaussteuerung

Bild 7 zeigt das grundsätzliche Aussteuerungsverhalten der Trioden-Gitterbasisschaltung. Die Gittervorspannung beträgt durch die potentialführende Katode –27,5 V (Arbeitspunkteinstellung).

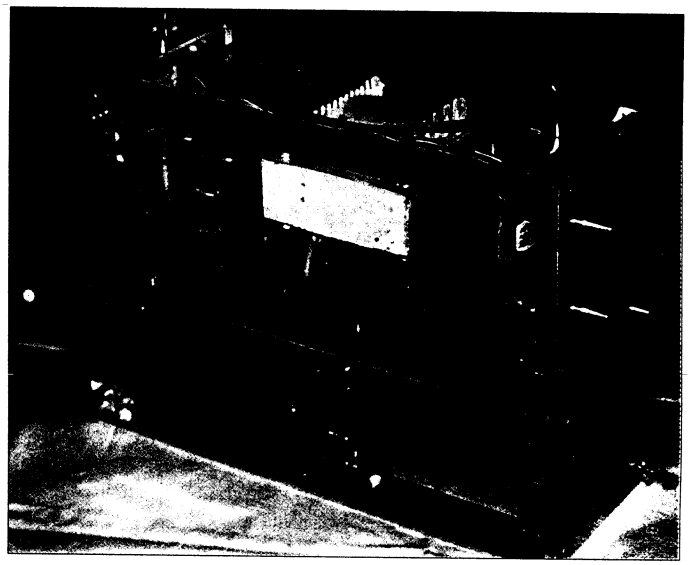
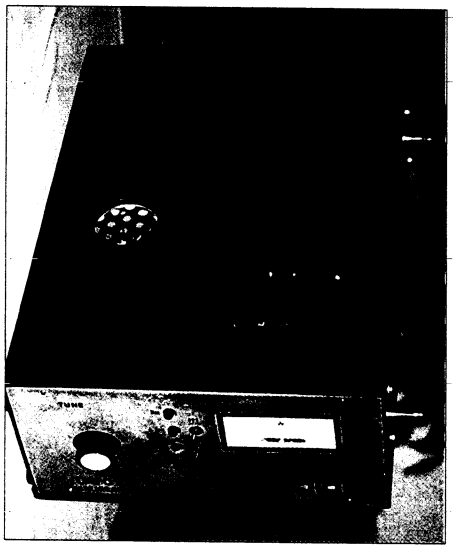


Bild 10: Ansicht ▶ von unten/hinten. Zu sehen rechts der Lüfter, vorn der Endstufentopf, oben in der Mitte der Hochspannungstransformator, darunter der Katodenkasten, links oben die Leiterplatten für die Hochspannungsgleichrichtung und die Steuerung

Bild 11: Eine komplette Endstufe. Der seitliche Tragegriff erleichtert den Transport.

Fotos: DK2DO



Daraus läßt sich leicht errechnen, bis zu welchem Aussteuerschwellwert kein Gitterstrom fließt. Bei Vollaussteuerung ist ein gewisser Gitterstrom unvermeidlich. Am Gitter wird damit auch eine bestimmte Verlustleistung umgesetzt, die auf ein Minimum zu beschränken ist. Eine zu hohe Verlustleistung führt zu einer temperaturabhängigen Verformung des Gitters. Die wiederum bewirkt eine Verstimmung.

Bis zum 1-dB-Kompressionspunkt sind Nichtlinearitäten einer Triode verkraftbar. Das Leistungsoptimum wird aber in der Regel erst beim 3-dB-Kompressionspunkt erreicht. Die Differenz zwischen beiden Punkten beträgt, wie aus Bild 7 ersichtlich, etwa 50 W, auf die man zugunsten der Linearität verzichten sollte.

Allgemein läßt sich sagen, daß man bei der Aussteuerung aller Leistungsendstufen auf die letzten 10 % Ausgangsleistung verzichten möge, wenn auch die hohe Selektivität aller Röhrenendstufen eine Vollaussteuerung zuläßt.

Bisher wurden zwölf Exemplare der Endstufe aufgebaut und von Contestgruppen getestet. Alle funktionierten auf Anhieb und waren auch nach 24 Betriebsstunden noch temperaturstabil.

Wer sich für einen fertigen Mechaniksatz oder eine betriebsfertige Endstufe interessiert, wende sich bitte an den Verfasser: Tel. (0 66 22) 66 81.