

Nachbau lohnenswert

## ***Linear-Endstufe für Niederfrequenz und Langwelle***

***Arno Weidemann, DL9AH***

Angeregt von anderen Funkamateuren reizte es den Autor, eine komplementäre Endstufe mit über 700 W Output für Niederfrequenz zu entwickeln, die gleichzeitig auch im Langwellenbereich einsetzbar ist.

Der Verfasser hat sich u. a. seit mehr als 40 Jahren auch mit der Entwicklung von Linear-Endstufen beschäftigt. Zunächst im Niederfrequenz- und danach im Kurzwellenbereich. Es begann mit Hochspannungsrohren, ging weiter mit Zeilenendrohren aus dem Fernsehbereich und seit vielen Jahren auch unter der Verwendung von sehr preiswerten MOS-Feldeffekttransistoren.



Wichtig war ihm dabei, dass die Kosten niedrig, die Schaltung einfach und nachbausicher sowie robust war. Nach längerem harten Probetrieb hat er die verschiedenen Schaltungsvarianten anschließend in einer Serie von Artikeln in den verschiedenen Fachzeitschriften der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

So wundert es nicht, dass er mehrfach auf den verschiedenen Kurzwellenbändern sowohl von Deutschen als auch von ausländischen Funkamateuren gefragt wurde, ob er denn nicht auch eine Langwellen-PA entwickeln könne. Obwohl der Verfasser selbst an Langwelle nicht interessiert ist, reizte es ihn doch, einmal eine komplementäre Endstufe mit über 700 W Output für Niederfrequenz zu entwickeln, die gleichzeitig auch im Langwellenbereich einsetzbar ist. So entstand diese Schaltung.

### **Schaltungsprinzip komplementäre Endstufe**

Bei der im Prinzip einfachen – schon seit langem in der Niederfrequenztechnik bekannten – Schaltung handelt es sich um eine komplementäre Endstufe. Hierbei ergänzen (komplementär) sich jeweils ein N-Channel-Transistor (T2) und ein P-Channel-Transistor (T3) dergestalt, dass der N-Channel nur die positive und der P-Channel-Transistor nur die negative Halbwelle verstärkt. Beide Transistoren wer-

den mit gleicher Phase angesteuert. Eine Phasendrehung im Eingang oder eine Wiederherstellung der vollen Periode im Ausgang sind daher unnötig.

Beide Transistoren arbeiten in Drain-Basis- oder Sourcefolger-Schaltung. Das hat sowohl Nach- als auch Vorteile. Zum einen liegt keine Spannungsverstärkung vor, das heißt, der Spannungsverstärkungsfaktor  $V_u$  ist  $<1$  (ca. bei 0,8...0,9). Zum anderen führt das aber gleichzeitig – infolge der hohen Gegenkopplung – zu einer besonders hohen Qualität. Dies hier um so mehr, als alle Feldeffekttransistoren über eine quadratische, also verstärkungstechnisch gesehen, besonders gute Kennlinie verfügen.

Nach dem Einschalten soll die Betriebsspannung von maximal 200 V möglichst weich hoch laufen (s. a. S. 733 „Vorschlag für passendes Netzteil“). Das gilt besonders für den Niederfrequenzbetrieb. Bei einem Lastwiderstand von ca. 3,5  $\Omega$  muss – zur Erreichung einer unteren Grenzfrequenz von unter 50 Hz – der Koppelkondensator C6 eine Kapazität von mindestens 1000  $\mu\text{F}$  (besser 2000... 3000  $\mu\text{F}$ /ca. 250 V) haben. Das führt beim Einschalten automatisch zu einem großen Aufladestrom über den Gleichstromwiderstand der Lautsprecher. Wird das Netzteil aber z. B. zunächst über einen Vorwiderstand eingeschaltet, der nach ca. 5 s mit einem zweiten Schalter überbrückt wird, so hält sich das Einschaltgeräusch in

Grenzen.

Die Serienschaltung von R5, R6 plus Z1 und R7 bildet einen Gatespannungsteiler, der automatisch dazu führt, dass sich die Betriebsspannung am Ausgang zwischen R9 und R9 halbiert. Der Spannungsabfall an Z1 und R6 bestimmt den Arbeitspunkt der Endstufentransistoren T2 und T3. Das Trimpoti R6 sollte beim ersten kontinuierlichen Hochfahren zunächst auf den kleinsten Widerstandswert eingestellt werden. Bei ständiger Kontrolle des Betriebsstromes wird dann der Ruhestrom der Endstufe auf ca. 0,3 A oder der Gesamtstrom auf ca. 0,4 A eingestellt.

### **Sinus-Dauerbetriebsfest soll sie sein**

Dieser Wert reicht aus um, einen Klirrfaktor von besser 1 % zu erreichen. Will man die Qualität noch weiter erhöhen, kann man den Ruhestrom entsprechend erhöhen. Die Übernahmeverzerrungen gehen dann noch weiter zurück – der Wärmeanfall an den Kühlkörpern nimmt allerdings zu. Der Verfasser hat bei dem abgebildeten Labormuster mehrere Male 11 min lang, sowohl im Niederfrequenz- als auch im Langwellenbereich, einen Sinus-Dauerbetrieb mit mehr als 500 W Output vorgenommen. Dass bei einem solchen Dauerbetrieb die Kühlkörper mit einem Ventilator gekühlt werden müssen versteht sich von selbst.

Die Linear-PA ist insoweit sinusdauerbe-

triebsfest. Wer im Langwellenbereich allerdings vor hat, rechnergestützte Sonderbetriebsarten zu verwenden, und dabei unter Umständen stundenlang einen Träger stehen lassen will, sollte besonders große Kühlkörper verwenden und an einem starken Kühlstrom nicht sparen. Aufgrund der Phasenablage zwischen Ausgang und Eingang, den Rückwirkungs-

### Technische Daten

Output	ca. 750 W (Einton Oberstrich) bei 195 V stabilisiert
Frequenz	50 Hz...350 kHz
Klirrfaktor	ca. 1 %
IMD <sub>3</sub>	ca. 40 dB (bezogen auf Zweiton)
Steuerspannung	ca. 1 V
Steuerleistung	ca. 50 mW
Betriebsspannung	190 V, max. 200 V (möglichst stabilisiert)
Stromaufnahme	ca. 7...8 A
Ruhestrom	NF: 0,5...1 A; Langwelle (CW): ca. 0,3 A
Input	ca. 1200...1400 W
Wirkungsgrad	ca. 60 %

kapazitäten und der Parallelschaltung vieler Einzeltransistoren auf den Chips, neigen alle Feldeffekttransistoren dazu, im UKW-Bereich wild zu schwingen. Die Gatevorwiderstände R8 sollten von daher an jedem Transistor nicht vergessen werden. Wegen des Spannungsverstärkungsfaktors  $V_u$  der Endstufe von  $<1$  muss notwendigerweise ein Spannungsverstärker vorgeschaltet werden. Er besteht aus dem

Transistor T1 mit Beschaltung. Er liefert die für die Ansteuerung der Endstufe notwendige Steuerspannung von ca.  $\pm 90 V_s$  (bei ca. 200 V Betriebsspannung). Voraussetzung dafür ist allerdings, dass R1 so eingestellt worden ist, dass sich am Drain von T1 eine Gleichspannung von  $U_{\text{Betrieb}}/2$  (hier ca. 100 V) einstellt. Der Außenwiderstand R4 mit dem Blindwiderstand der Drossel Dr1 ist so berechnet, dass sich eine obere Grenzfrequenz  $>500 \text{ kHz}$  ergibt. Am Transistor T1 wird eine elektrische Leistung von ca. 10 W in Wärme umgesetzt. Er muss also ebenfalls entsprechend

gekühlt werden. Durch die Schaltungsart und durch die Dimensionierung wurde eine sehr gute Temperaturstabilisation erreicht. Der Arbeitspunkt läuft also auch bei Erwärmung nicht weg. Die Verstärkung ist so hoch, dass man mit einer Steuerspannung von ca. 1 V Vollaussteuerung erreichen kann.

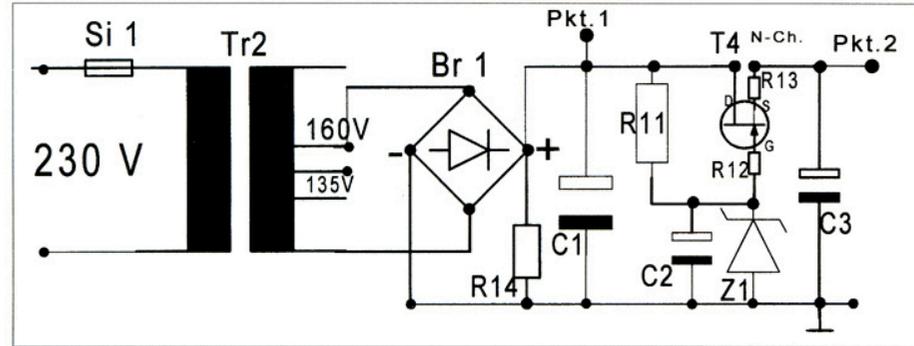


Bild 3: Schaltbild des Netzteilvorschlags

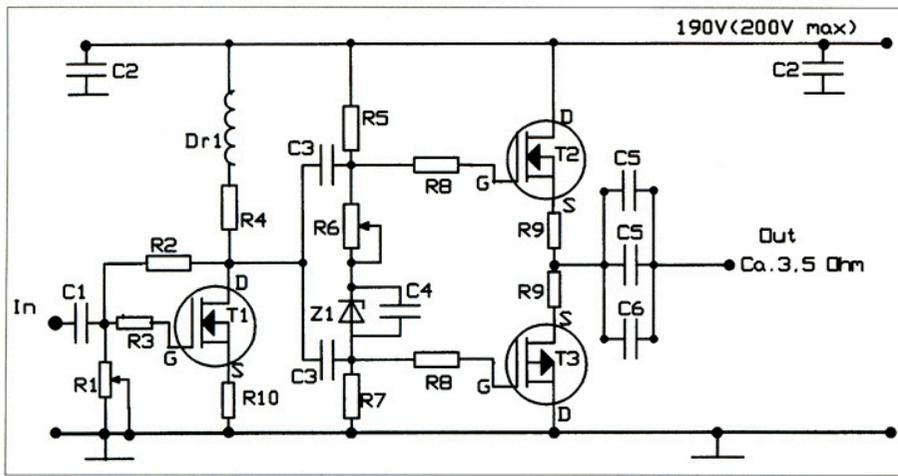


Bild 1: Schaltbild der Linearendstufe im Niederfrequenzbetrieb

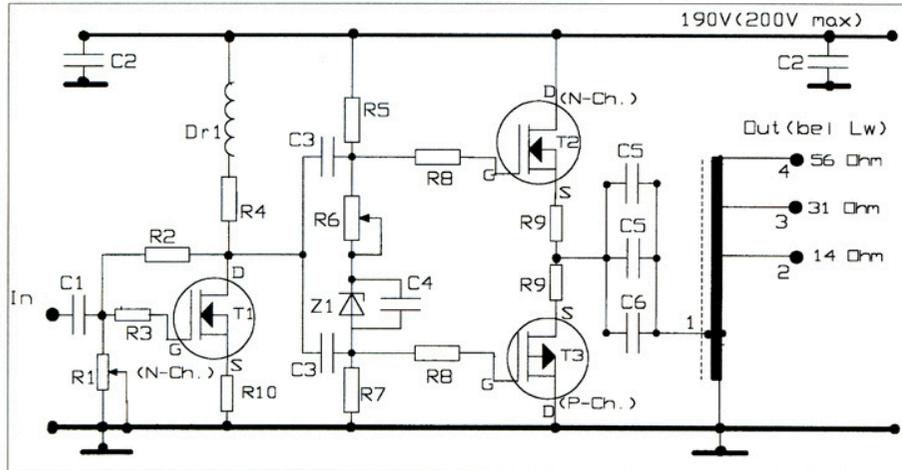


Bild 2: Schaltbild der Linearendstufe im Langwellenbetrieb

## Nationale Bestimmungen beachten!

Es muss darauf hingewiesen werden, dass beim Einsatz auf Langwelle die jeweiligen nationalen Bestimmungen beachtet werden müssen. Während in anderen europäischen Staaten zusätzliche Frequenzen (um 70 kHz) und Leistungen bis 1000 W verwendet werden dürfen, sind in Deutschland zurzeit nur 20 W erlaubt.

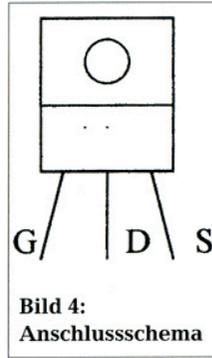
Für Versuche kann bei den jeweils örtlich zuständigen Außenstellen der RegTP ein formloser Antrag für besondere experimentelle und technisch-wissenschaftliche Studien nach §16 der Amateurfunkverordnung gestellt werden. Bei ausreichend begründeten Anträgen wird dann 1 W ERP auf Langwelle als Ausnahme erlaubt.

Ein Antrag nach §16 AFuV sollte daher eine Beschreibung der Versuche, der Besonderheiten und der zu erwartenden Ergebnisse enthalten, sodass damit eine Ausnahme gerechtfertigt werden kann. Im Fall von 1 W ERP auf Langwelle liegt es z.B. auch im Interesse der Behörde Erfahrungen zur Störsituation zu gewinnen. Es bleibt zu hoffen, dass auch in Deutschland eine Angleichung an den europäischen Standard erfolgen wird. Während die vorgelegte Schaltung also im Ausland voll eingesetzt werden kann, darf sie in Deutschland auf Langwelle nur mit reduzierter Leistung betrieben werden.

Bei der Betrachtung der Stückliste fällt auf, dass für die Endstufentransistoren T2 und T3 nicht wenige „dicke“ Transistoren, sondern viele kleine Transistoren eingesetzt worden sind. Das hat seinen besonderen Grund. Bei der Gegenüberstellung der Summe der Eingangskapazitäten ergeben viele kleine Transistoren eine kleinere Kapazität als wenige große. Da alle Einzeleingangskapazitäten aber über die jeweiligen Gatevorwiderstände (R8) und den beiden Koppelkondensatoren C3 den Ausgang des Spannungsvorverstärkers T1 „beschweren“, bestimmen sie mit die obere Grenzfrequenz dieser Stufe. Es kommt also darauf an, mit einer möglichst kleinen Gesamteingangskapazität die notwendige Leistung zu erbringen. Das ist auf diese Art geschehen.

Es kommt hinzu, dass viele Einzeltransistoren ihre Wärme besser auf den Kühlkörper übertragen können als wenige große. Bei der Parallelschaltung der jeweiligen P-Channel- und N-Channel-Transistoren erhält jeder einen eigenen Source-Widerstand. Das ergibt nicht nur eine zusätzliche Linearisierung, sondern die hier ja nicht ausgesuchten Transistoren gleichen sich bei den Spitzenströmen sehr gut an.

Beim Langwellenbetrieb ist es notwendig, die maximale Ausgangsschwingspannung



**Bild 4:**  
**Anschlussschema**

Spartransformator Tr1 ist in der Einzelteilaufstellung beschrieben. Er ist nur bei Langwellenbetrieb notwendig. Einige Anzapfungen erlauben den Anschluss an unterschiedliche Lastwiderstände. Wird nur Langwellenbetrieb angestrebt, kann der Kondensator C6 auf 0,22 mF/250 V zurückgenommen werden.

Wie bei allen komplementären Endstufen ist ein zu hoher Lastwiderstand im Ausgang unschädlich. Zu erkennen ist dieser Fall daran, dass die Endstufe auch bei Vollensteuerung nicht den normalen Strom von ca. 7 A zieht. Ein wesentlich zu kleiner Widerstand oder gar ein Kurzschluss im Ausgang führt zu enorm hohen Strömen und kann allerdings die Endstufe gefährden. Eine kurzzeitige Überlastung ist aber auch hier unbedenklich, da alle Transistoren in der Endstufe zusammen über eine Verlustleistung von ca. 1000 W

von ca. 75 V<sub>s</sub> zu vervierfachen.

Das ergibt eine effektive Ausgangsspannung von ca. 210 V und bei einem Lastwiderstand von ca. 50 Ω eine Leistung von über 750 W. Der für die Hochsetzung der Ausgangsspannung notwendige

verfügen. Um also auf der sicheren Seite zu bleiben, ist es empfehlenswert, zunächst immer erst die Anzapfung 3 oder sogar nur Anzapfung 2 zu benutzen. Nahezu jeder einfache Schalter lässt sich an dieser Stelle verwenden. Wer in bezug auf schwankende Last bei kurzen Langwellenantennen besonders vorsichtig sein will, kann die Anzahl der Endstufentransistoren T2 von zehn auf zwölf und bei T3 von 15 auf 18 erhöhen. Das ist zwar nicht

### Stückliste Netzteil

- S1 8...10 A/träge
- Tr2 Netztransformator 160 V max., mit einer Anzapfung bei 135 V
- Br1 Brückengleichrichter 200 V/10 A oder größer;gegebenenfalls aus Einzeldioden
- C1 Lade-Elko ca. 5000 µF/250V oder größer
- C2 100 µF/250 V (bis 250 µF)
- C3 1000 µF/250 V oder größer
- R11 ca. 50 kΩ...70 kΩ, 0,5 W
- R12 ca. 100 Ω
- R13 1 Ω/2...4 W
- R14 ca. 30 kΩ
- Z1 Z-Diode 200 V, gegebenenfalls durch Serienschaltung von mehreren Einzeldioden
- T4 5 × FET IRFP 451 (450 V/180 W) mit jeweils einem eigenen R12 und R13 parallel, auf einem möglichst großen Kühlkörper

notwendig, bringt aber mehr Reserve bei schwankender Last. Überdimensionierung ist immer gut.

Für eine sichere Ableitung der Wärme ist es notwendig, die Endstufentransistoren nicht sofort auf die meist nicht ausreichend dickwandigen Kühlkörper zu montieren. Viel besser ist es, sie zunächst auf eine möglichst große Wärmekapazität, also auf einen großen Aluminiumklotz fest aufzuschrauben. Auf diesen erst werden dann die beiden Kühlkörper unter Verwendung von Wärmeleitpaste geschraubt. Der Autor verwendet als Kühlblöcke regelmäßig Aluminiumvollmaterial mit den Maßen 30 mm × 50 mm × 185 mm und einem ebenso langen aufgeschraubten Kühlkörper.

Die Montage kann im wesentlichen von oben auf einer einseitig kaschierten Epoxydharzplatine erfolgen. Dabei ist es wichtig, dass alle Drains von T3 direkt mit Masse verbunden werden. Bei den Drains von T2, die mitsamt der Kühleinheit gegen Masse isoliert aufgebaut worden sind, genügt es, die dort anliegende Betriebsspannung mit UKW-tauglichen Kondensatoren mehrfach nach Masse abzublocken (C2). Infolge der niedrigen Betriebsfrequenz ist die sonstige Verdrahtung unkritisch. Wegen der Einfachheit ist die Verwendung von DL9AH-Laborplatinen zu empfehlen [1].

## **Vorschlag für passendes Netzteil**

Wie bei allen Leistungsendstufen hängt die Qualität derselben sehr stark von der Güte des Netztes ab. Da einerseits auch bei größeren Netztransformatoren die gleichgerichtete Spannung unter Last mehr oder weniger zusammen bricht, andererseits bei der vorgelegten Schaltung auch die Leerlaufspannung wegen der P-Channel-Transistoren nicht über 200 V ansteigen darf, hat der Verfasser diese einfache Schaltung entwickelt. Durch die Parallelschaltung von fünf dicken, aber keineswegs teuren Feldeffekttransistoren erreicht man bei ausreichender Kühlung immerhin eine Drainverlustleistung von 900 W. Die Stabilisierung der Gatespannung mit Hilfe einer Z-Diode ist bei FETs besonders einfach, da sie im Gegensatz zu bipolaren Transistoren keinen Steuerstrom erfordern.

Durch die Dimensionierung von C2 und R11 erreicht man zusätzlich ein weiches Hochlaufen der Betriebsspannung. Die Zeitkonstante  $T1 = R \times C$  ergibt hier ca. 5 s. Die verbleibende Rest-Unstabilität dieses einfachen Reglers liegt bei <2 % und ist, auch im Hinblick auf die nahezu horizontale Ausgangskennlinie von FETs völlig bedeutungslos.

Bei Subcarrierverfahren – also bei stehendem Träger wie z. B. bei PSK 31 – kann man zur Einsparung der Wärmeverlustleistung an den Längstransistoren den

135 V umzuschalten. Erst dann kann die PA vom Punkt 1 versorgt werden.

Der Verfasser will mit diesen Schaltungen lediglich einen Anstoß zum Nachbau geben. Die wesentlichen Probleme sind gelöst. Die Realisierung der peripheren Dinge wie Relaisumschaltung, Mechanik usw. möchte er dem interessierten Leser selbst überlassen.

## Stückliste Linear-Endstufe

○ T1	1 x	IRFP 451 (450 V/180 W)
○ T2	10 x	IRF 620 (250 V/50 W)
○ T3	15 x	IRF 9622 (-200 V/40 W)
○ Z1	1 x	Z-Diode 6,5 V
○ Dr1	1 x	2,7 mH
○ C1	1 x	0,22...0,5 mF/50 V
○ C2	2 x	10 nF...0,22 mF/250 V
○ C3, C5, C6	5 x	0,22 mF/250 V (C6 bei NF-Betrieb min 1000 $\mu$ F/250 V (besser 2000 $\mu$ F oder mehr)
○ C4	1 x	3 nF...10 nF/250 V
○ R1	1 x	50 k $\Omega$ -Trimpoti linear (damit wird bei T1 die Drainspannung auf die halbe Betriebs- spannung eingestellt)

○ R2	1 x	750 k $\Omega$ ...1 M $\Omega$ / 0,1...0,5 W
○ R3, R8	26 x	80...120 $\Omega$ /0,5 W
○ R4	1 x	800...1100 $\Omega$ / ca. 12 W
○ R5, R7	2 x	56 k $\Omega$ /2 W
○ R6	1 x	2,5 k $\Omega$ -Trimpoti linear (damit wird der Ruhestrom auf ca. 0,3 A eingestellt)
○ R9, R10	26 x	3,9 $\Omega$ /1 W
○ Tr1	1 x	Ferritübertrager, $\dot{U} = 1:4$ , $\dot{U}_r = 1:16$

Entweder vier aufeinander gelegte Ferritringkerne, Durchmesser innen ca. 15 mm, Durchmesser außen ca. 25 mm; (Al-Wert ca. 3000) oder zwei aufeinander gelegte violette Ringkerne von Philips (Type: RCC36.6/15.6 – 4C 65) mit Innendurchmesser 22 mm, Außendurchmesser 36 mm, werden mit normal isolierter Litze (0,75 mm<sup>2</sup>) zu insgesamt 24 Windungen bewickelt. Die erste Lage zu sechs Windungen vom Anfang (Masse) bis Anzapfung 1 in großen Windungsabständen aufbringen. Dann weiter die zweite Lage in die Zwischenräume der ersten Lage wickeln. Nach der Anzapfung 2 weiter die dritte Lage in die verbleibenden Zwischenräume wickeln usw.

Und nun viel Erfolg!

**Arno Weidemann, DL9AH**  
**Blücherstr. 69, 44866 Bochum**  
**Tel./Fax (0 23 27) 1 04 54**

### Literatur

[1] Laborplatinen von Arno Weidemann, DL9AH;  
 CQ DL 1/76, S. 6