

Eine einfache 10-W-QRP-Endstufe für Kurzwelle

Dr.-Ing. W. DOBERENZ – Y21SN

Auf den Kurzwellenbändern trifft man immer häufiger auf Stationen, die auch in SSB mit geringer Sendeleistung arbeiten. Auch bei vielen Contesten hat sich eine gesonderte QRP-Teilnehmerklasse durchgesetzt.

Dabei dürfen vereinbarungsgemäß nur solche Stationen das Prädikat „QRP“ für sich in Anspruch nehmen, deren Sendereingangsleistung (Input) kleiner als 10 W ist. Für die Eigenbaupraxis stellt dieser Grenzwert eine besondere Herausforderung dar, muß man doch neben einer guten Antenne auch über eine Endstufe mit hohem Wirkungsgrad verfügen, um einen möglichst großen Prozentsatz der Eingangsleistung in HF-Ausgangsleistung umzusetzen.

Schaltungsprinzip

Eine transistorisierte Breitband-Endstufe im Gegentakt-AB-Betrieb stellt einen optimalen Kompromiß zwischen materiellem Aufwand und Wirkungsgrad dar (Bild 1). Der 1:1-Leitungsübertrager (Balun) am Ausgang ist vom Wirkungsprinzip her vergleichbar mit einem konventionellen Gegentaktrafo, der primär- und sekundärseitig die gleiche Windungszahl hat (Bild 2). Der 1:1-Balun hat aber den Vorteil, daß er bei gleichen Kernabmessungen breitbandiger und wesentlich verlustärmer aufzubauen ist. Allerdings wird zum Bewickeln eine Leitung mit vorgegebenen Wellenwiderstand Z_0 benötigt. Bei einem üblichen Abschlußwiderstand $R_A = 50 \Omega$ genügen hierfür aber zwei verdrillte CuL-Drähte. Eine kleine Näherungsrechnung soll nun zeigen, daß ein 1:1-Balun in Verbindung mit einer Betriebsspannung zwischen 12 und 14 V auf die vorgegebene Eingangsleistung von etwa 10 W führt. Damit wird gleichzeitig auch den Anforderungen des Portable-Einsatzes (Versorgung aus der Kfz-Batterie) Rechnung getragen.

Nährungsrechnung am idealen Gegentakt-B-Verstärker

Obwohl die Endstufe bei SSB im AB-Betrieb arbeitet, können in guter Näherung die Bedingungen des B-Betriebes zugrundegelegt werden. Der Einfachheit halber werden auch ideale Transistoren ($U_{CESATHF} = 0$) und ein verlustreicher Übertrager vorausgesetzt. Der Kollektor jedes Transistors „sieht“ als wirksame Last ein Viertel der Größe von R_A :

$$R_L = R_A/4 = 12,5 \Omega$$

(Wie Bild 2 zeigt, liegt zwischen der Eingangsklemme 1 bzw. 2 und Masse jeweils die halbe Ausgangsspannung U_A . Die Widerstandstransformation erfolgt immer quadratisch zum Spannungsverhältnis!) Im folgenden beziehen wir uns auf Vollaussteuerung und eine Betriebsspannung $U_B = 14 \text{ V}$: Jeder Transistor muß dann (im Halbwellenbetrieb) einen Spitzstrom von

$$I_{CM} = U_B/R_L = 1,12 \text{ A}$$

„verkraften“.

Das entspricht einem mittleren Gleichstromanteil von

$$I_{CAV} = I_{CM} \pi = 0,36 \text{ A.}$$

Der von der Spannungsversorgung entnommene Strom für beide Transistoren ist demnach

$$I_0 = 2 \cdot I_{CAV} = 0,72 \text{ A.}$$

Die Eingangsleistung ergibt sich daraus zu

$$P_{in} = U_B \cdot I_0 \approx 10 \text{ W.}$$

Wie aus der Literatur [1] bekannt, erreicht der ideale B-Verstärker bei Vollaussteuerung den maximalen Wirkungsgrad

$$\eta_{max} = P_{out}/P_{in} = 0,78$$

In der Praxis wird dieser Wert aber bei

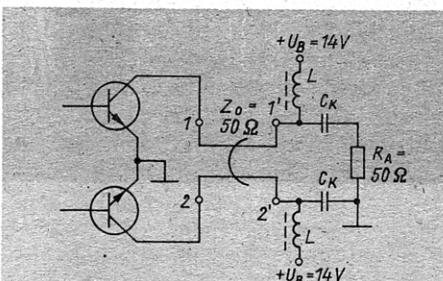


Bild 1: Übersichtsschaltplan der 10-W-QRP-Endstufe

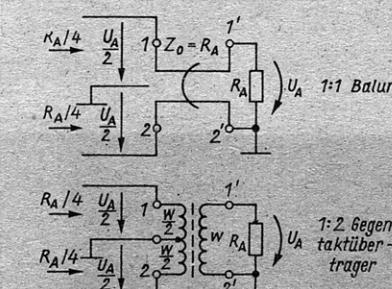


Bild 2: Vergleich von Spannungs- und Widerstandstransformation bei einem 1:1-Balun und einem 1:2-Gegentakttransformator

weitem nicht erreicht. Bedingt durch zusätzliche Verluste in den Transistoren (U_{CESAT}) oder z. B. im Übertrager, liegt η_{max} etwa zwischen 0,3 und 0,6. Bei einer 10-W-QRP-Endstufe ist deshalb mit einer Ausgangsleistung von etwa 3 bis 6 W zu rechnen (Eintonaussteuerung).

Anforderungen an die Transistorgrenzdaten

Endstufentransistoren werden meist in der Nähe ihrer zulässigen Grenzdaten (P_V , U_{CEO} , I_{CM} , I_{CAV}) betrieben. Eine Überschreitung dieser Werte ist die häufigste Ursache für Mißerfolge beim Nachbau und außerdem eine kostspielige Angelegenheit. Andererseits ist eine total überdimensionierte Endstufe auch keine zufriedenstellende Lösung: Je „dicker“ der Transistor, desto geringer ist im allgemeinen seine Leistungsverstärkung. Im Vergleich zu einem Typ mit geringerer zulässiger Verlustleistung benötigt er also erheblich mehr Ansteuerleistung. Die für die QRP-Endstufe erforderlichen optimalen Grenzdaten sind:

– **Verlustleistung** $P_V \approx 5 \text{ W}$. Da sich P_V aus der Differenz von P_{in} zu P_{out} ergibt, hätte in einer idealen Gegentakt-B-Endstufe jeder Transistor nur ein reichliches Watt in Wärme umzusetzen. Dies gilt allerdings nur bei Vollaussteuerung. Bei 0,6- bis 0,7facher Vollaussteuerung mit einem Eintonsignal steigt die Verlustleistung auf den etwa 1,5fachen Wert [1]. Weiterhin muß man die im nichtidealen Transistor entstehenden zusätzlichen Verluste sowie den Einfluß erhöhter Umgebungstemperatur (Sommer-Portablebetrieb) und begrenzter Kühlflächen berücksichtigen.

– **Kollektor/Emitter-Spannung**

$U_{CEO} \approx 18 \text{ V}$. Der Einsatz von Niedervolt-Typen empfiehlt sich aufgrund ihres besseren Wirkungsgrades.

Kollektorspitzenstrom $I_{CM} \geq 1,5 \text{ A}$. Dieser ist reichlicher zu wählen, da die HF-Stromverstärkung in der Nähe von I_{CM} bereits merklich absinkt.

– **Mittlerer Kollektorstrom** $I_{CAV} > 0,5 \text{ A}$.

– **Transitfrequenz** $f_T > 100 \text{ MHz}$. Falls auf die hochfrequenten KW-Bänder verzichtet wird, genügen auch Typen mit geringerer f_T .

Nach [1] erfüllen die VHF-Typen KT 920 A bzw. KT 925 A diese Forderungen am besten. Mit geringen Abstrichen bezüglich maximal möglichen Wirkungsgrades ist auch der bekannte KT 904 A einsetzbar. Gut eignet sich auch der unter Amateuren verbreitete B 3-12 (CTC-B-Serie).

Prinzipiell ist auch der Einsatz leistungsfähiger Typen möglich, wobei allerdings die negativen Auswirkungen auf Wirkungsgrad, Treiberleistung und Anschaffungskosten zu beachten sind. Angesichts des eigenen, recht stattlichen „Transistorfriedhofs“, möchte der Autor folgende Erfahrungen an Newcomer weitervermitteln:

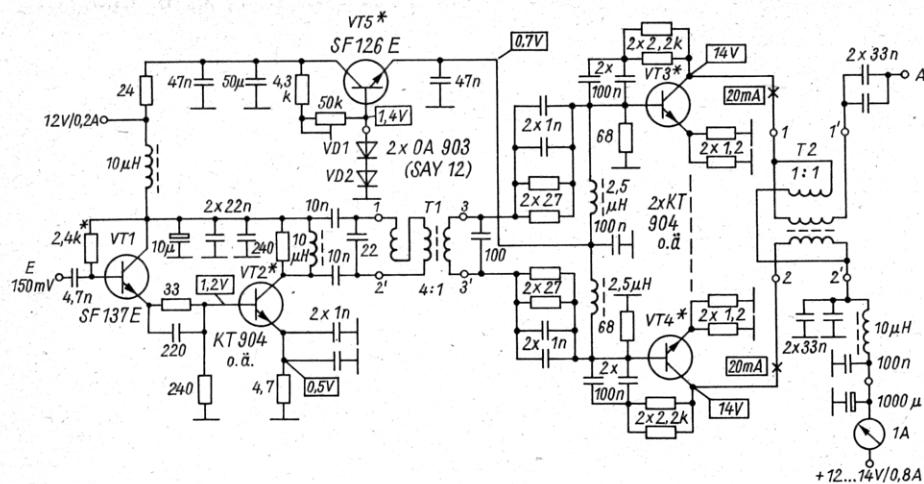


Bild 3: Stromlaufplan einer erprobten 10-W-QRP-Endstufe einschließlich Treiberstufe. Die Basisdrosseln von VT3 und VT4 sind zur Hälfte abgewickelte 10- μ H-Entstörinduktoren. VD1 und VD2 werden mit EP-11-Kleber direkt auf bzw. in unmittelbarer Nähe von VT2 und VT4 angebracht. Die Verbindung zwischen den Emittoren von VT3 und VT4 ist nur bei Einsatz von KT907 (Emitteranschluß am Gehäuse) notwendig. Die Emitterwiderstände von VT3 und VT4 können bei modernen Transistoren mit interner Stabilisierung entfallen. Die Übertrager T1 und T2 sind auf je einen Doppelochkern aus MF240 (als FS-Antennensymmetrierglied) gewickelt (Bild 4). T2 verfügt über eine zusätzliche Magnetisierungswicklung.

Wichtige Hinweise für den Umgang mit HF-Leistungstransistoren

- Den Transistor niemals ohne vorhandene Kollektorspannung und ohne angeschlossenen Lastwiderstand betreiben!
- Nie den maximal zulässigen Kollektorstrom und die vorgeschriebene Betriebsspannung überschreiten!
- Niemals den Transistor ohne Kühlkörper und ohne angeschlossenen Temperaturfühler betreiben! Auf guten thermischen Kontakt zum Kühlkörper ist zu achten, dabei Gewindestöpseln nicht übermäßig festdrehen (mit Silikonfett dünn einreiben).
- Niemals die maximal zulässige Verlustleistung überschreiten! Vor Einsatz ist eine Kontrollrechnung anhand der Katalogdaten von δ_j und $R_{th,je}$ durchzuführen:

$$R_v < (\delta_j - \delta_c) / R_{th,je}$$

δ_j ist dabei die zulässige Sperrsichter Temperatur ($120^\circ\text{C} \dots 160^\circ\text{C}$), $R_{th,je}$ der thermische Innenwiderstand Sperrsicht – Gehäuse und δ_c die Temperatur des Kühlkörpers (immer höher als Umgebungstemperatur)

- Größte Vorsicht beim Messen! Ein versehentliches Abrutschen der Meßklemmen kann einen Kurzschluß und eine Zerstörung der Endstufentransistoren nach sich ziehen.
- Bei Transistoren im SOE-Gehäuse (Stripline-Opposed-Emitter) ist die Unterseite der Anschlußstreifen vor dem Einlöten zu verzinnen. Vorsicht, die Anschlußstreifen reißen leicht ab!

Ausführungsbeispiel

Bild 3 zeigt die Schaltung einer vom Autor aufgebauten QRP-Endstufe. Die mit VT1 und VT2 bestückte Treiberstufe wurde

Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme sollten unbedingt ein HF-tauglicher Oszilloskop und ein Regelnetzteil mit einstellbarer Strombegrenzung zur Verfügung stehen. Vom Transceiverausgang muß ein Einton-HF-Signal von 100 bis 200 mV niedrigohmig bereitgestellt werden. Ideal ist auch ein Zweiton-Signal, weil hier Verzerrungen am ehesten und Überlastungen der Endstufe weitgehend vermieden werden. Die Inbetriebnahme erfolgt in der Reihenfolge 1. Treiberstufe, 2. Vorspannungs-erzeugung, 3. Endstufe.

Treiberstufe: Die Sekundärseite von T1 wird vorübergehend von der übrigen Schaltung abgetrennt, beide Anschlüsse legt man über zwei 8,6- Ω -Widerstände provisorisch an Masse. Mit dem Basiswiderstand von VT1 ist für VT2 ein Kollektorstrom von ungefähr 100 mA einzustellen ($\approx 0,5$ V am Emitter). Achtung! Die an VT2 in Wärme umgesetzte Verlustleistung beträgt etwa 1,2 W; damit ist nur ein kurzzeitiger Betrieb ohne Kühlkörper möglich. L.t. Herstellerangaben sollte die Gehäusetemperatur des KT 904 nicht über 85°C ansteigen [1].

Bei etwa 150 mV Eingangsspannung an der Basis von VT1 muß am Kollektor von VT2 der Begrenzungseinsatz bei etwa 6 V ($U_{ss} = 18$ V) liegen. Jeder Anschluß der Sekundärseite von T1 führt dann ungefähr 1,5 V ($U_{ss} \approx 4,5$ V) gegen Masse (ungefähr 500 mW Treiberleistung).

Vorspannungsquelle: Man trennt den Emitter von VT5 vorübergehend vom Basiskreis der Endstufe und legt ihn provisorisch über 17Ω auf Masse. Er muß nun ein Potential von etwa 0,75 V führen. Der 50-k Ω -Regler wird auf seinen Maximalwert eingestellt.

Endstufe: Ausgangsseitig schließt man einen 50- Ω /5-W-Lastwiderstand als Antennennachbildung an (5 ungewendete 270- Ω /1-W-Schichtwiderstände parallel über handelsüblichen Koaxialstecker löten). Parallel dazu schließt man noch einen 10:1-Teiler (47 und 430 Ω) für den Oszilloskop an. Viele Oszilloskopen (z. B. EO 174 A) eignen sich nicht für die direkte Messung größerer HF-Spannungen. Durch parasitäre HF-Einstreuungen in den Meßbereichsschalter treten ohne Verwendung eines Verteilers Fehlmesungen bis zu 100% auf!

Nun speist man die Endstufe aus einem separaten Netzteil mit Strombegrenzung auf 0,8 A und erhöht die Betriebsspannung unter ständiger Kontrolle der Stromaufnahme auf ihren Endwert von 14 V. Mit dem 50-k Ω -Regler stellt man einen Ruhestrom von 40 mA ein. Erst jetzt darf man die Endstufe ansteuern! Die an der 50- Ω -Last gemessene Spannung muß gleichlaufend mit der Erhöhung der Eingangsspannung kontinuierlich ansteigen (Zittern und Sprünge deuten auf Schwingneigung hin). Der Begrenzungseinsatz ist bei etwa 15 V ($U_{ss} \approx 45$ V) er-

zum Teil aus [2] entnommen. Für T1 erwies sich der Einsatz eines konventionell gewickelten 4:1-Differentialübertragers als zweckmäßiger. Die aufwendig erscheinende gleichstrommäßige Entkopplung der Primärwicklung vom Kollektorstromkreis von VT2 dient dem Schutz der Endstufentransistoren bei einem eventuellen Windungskurzschluß. Die allgemein übliche Basisvorspannungs-erzeugung für die Endstufe mittels einer über Vorwiderstand betriebenen Si-Diode (SY 171) führte zur Instabilität des Kollektorruhestroms. Deshalb wurde die Vorspannung mit Hilfe einer getrennten Serienstabilisatorstrecke (VT5) erzeugt. Diese Variante hat sich ausgezeichnet bewährt. Da nunmehr zwei Dioden kleiner Verlustleistung als Temperaturfühler wirksam werden, kann je eine Diode direkt auf das Gehäuse von VT3 bzw. VT4 aufgeklebt werden (mit EP-11-Zweikomponentenkleber). Auch bei kurzzeitigem Betrieb der Endstufe ohne Kühlkörper kam es zu keinem gefährlichen Hochlaufen des Ruhestroms mehr. VT5 ist allerdings unbedingt mit einem Kühlstern auszurüsten! Für den Ausgangsbalun T2 erwies sich der Einsatz eines einzigen Doppelochkerns als ausreichend. Das Wickelschema der Übertrager ist Bild 4 zu entnehmen.

Der Schaltungsaufbau erfolgte auf einer doppelseitig kaschierten Leiterplatte mit den Abmessungen 55 mm \times 115 mm. Die Bestückungsseite ist gleichzeitig Massebene. Die Leitungsführung ist relativ unkritisch; als Anhaltspunkt kann die in [2] veröffentlichte Platinenzeichnung dienen. Das Kühlblech (1-mm-Messing) ist 100 mm \times 115 mm groß, es wird in etwa 15 mm Höhe direkt an die Gewindestöpseln der „KT“-Transistoren oberhalb der Bestückungsseite angeschraubt. Die überstehenden Längsseiten werden U-förmig abgewickelt.

reicht, was einem Output von ungefähr 4,5 W entspricht ($\eta_{max} = 45\%$). Die Stromaufnahme der Endstufe muß bei 0,7...0,8 A für Eintonvollaussteuerung liegen. Höhere Werte deuten in jedem Fall auf Übersteuerung und damit auf Verzerrungen hin. Da dann gleichzeitig auch die Verlustleistung in jedem Transistor drastisch ansteigt, ist auch im späteren praktischen Einsatz stets die Stromaufnahme der Endstufe zu kontrollieren (spezielles 1-A-Meßinstrument an der Frontplatte). Nach längerem Betrieb darf sich der Kollektorrückstrom von VT3 und VT4 nicht wesentlich erhöhen (auf max. 80 mA). Beide Transistoren müssen sich gleichmäßig erwärmen, andernfalls ist eine Symmetriekontrolle erforderlich.

Schlußbemerkungen

Die 10-W-QRP-Endstufe habe ich nur für 3,5 MHz und 14 MHz eingesetzt. Für die anderen Bänder liegen noch keine Erfahrungen vor. Zur Oberwellenunterdrückung dienen zweigliedrige unversteilerte Tiefpässe, die über GBR-Relais umschaltbar sind. Die Induktivitäten mußten als Luftspulen realisiert werden, da sich die ursprünglich verwendeten Ferritkerne stark erwärmen.

Nach Anschluß eines exakt bemessenen Doppeldipols konnte auf ein spezielles Antennenanpaßgerät verzichtet werden. Bewährt hat sich der nachträgliche Einbau eines kleinen Leistungs- und Stehwellenmeßgeräts. In Verbindung mit der Kontrolle der Stromaufnahme der Endstufe

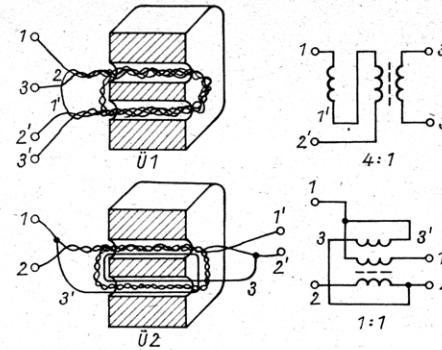


Bild 4: Wickelschema der Übertrager

T1: 4 Wdg. trifilar ($3 \times 0,3\text{-mm-CuL}$) über den Innensteg (das Ende von Wicklung 1 wird mit dem Anfang von Wicklung 2 verbunden)

T2: 5,5 Wdg. ($2 \times 0,5\text{-mm-CuL}$) bifilar und 5,5 Wdg. ($1 \times 0,5\text{-mm-CuL}$) einfach über den Innensteg. Zuerst wird die Bifilarwicklung aufgebracht, dann vom entgegengesetzten Ende die Einfachwicklung 3 im gleichen Sinn. Verbunden werden der Anfang von Wicklung 3 mit dem Ende von Wicklung 2 und des Endes von 3 mit dem Anfang von 1.

hat man damit stets einen Überblick über die ordnungsgemäße Funktion des Senders. Sehr zu empfehlen ist auch das Einlöten eines Schutzwiderstandes von etwa $1,8\text{k}\Omega$ parallel zur Antennenbuchse zwecks Ableitung elektrostatischer Aufladungen der Antenne.

Vor einer gedankenlosen Erhöhung der Betriebsspannung zwecks Vergrößerung des Outputs muß dringend abgeraten werden. Neben einer drastischen Verschlechterung des Wirkungsgrades besteht die Gefahr, daß durch Überschrei-

tung der Grenzwerte die Endstufentransistoren zerstört werden. So wird z. B. beim KT 904 der zulässige Kollektorspitzenstrom bereits bei $U_B = 16\text{V}$ erreicht. Falls leistungsstärkere Typen mit höherer zulässiger Kollektorspannung U_{CEO} eingesetzt werden, z. B. KT 907, so ist bei $U_B = 24\text{V}$ und $I_o = 1,5\text{A}$ mit einer Ausgangsleistung von 12 bis 14 W zu rechnen. Der Ruhestrom von VT2 ist dann jedoch auf 150 mA zu vergrößern und die Ansteuerspannung von VT1 auf 200 bis 250 mV zu erhöhen. Vom Verfasser wurden auch BLY 15 A (bis 14 MHz) und KU 612 (bis 7 MHz) mit Erfolg getestet, allerdings sind bei 14-V-QRP-Betrieb mit diesen Typen keine optischen Ergebnisse mehr zu erwarten.

Die im praktischen SSB-Bereich mit der 10-W-QRP-Endstufe erzielten Ergebnisse übertrafen alle Erwartungen. Die Mehrzahl der auf 3,5 MHz erhaltenen Rapporte lag zwischen S8 und S9, auf 14 MHz zwischen S6 und S7. Insbesondere auf 14 MHz liegen weitere Reserven in einer Verbesserung der Antennenanlage. Aufgrund der relativ niedrigen Stromaufnahme ist auch ein mehrstündiger Betrieb mit Monozellen möglich. Auch in unmittelbarer Nähe einer Fernsehantennenanlage wurde keinerlei TVI festgestellt.

Literatur

- [1] Lechner, D., Finck, P.: Kurzwellensender, Militärverlag der DDR, Berlin 1979
- [2] Seifert, H.: Ein SSB/CW-Allband-Portable-Transceiver nach dem Direktmischprinzip, Teil 3, FUNKAMATEUR 28 (1979), H. 12, S. 606 bis 609

mal 5 Minuten abgeschlossen ist. Bei der handelsüblichen Konzentration werden 100 ml Säure mit etwa 150 ml Wasser verdünnt.

Vorsicht!

Bei Arbeiten mit Säure Gummihandschuhe tragen, Raum belüften. Nach dem Entfernen des Lacks von der Leiterplatte mit Aceton oder Nitroverdünnung sind die Löcher zu bohren und nach der Bestückung ist die Leiterplattenseite mit Flussmittel oder lötfähigem Abdecklack zu bestreichen. Auf jeden Fall ist nach dem Ätzen die Leiterplatte zu säubern und mit einem Abdecklack vor Korrosion zu schützen.

Nach dem Trocknen werden die Löcher gebohrt. Als Leiterplatten-Material wird vorzugsweise Cewasit verwendet. Das hat den Vorteil, daß die Leiterzüge durch das Material scheinen und damit der Blick auf die Bestückungsseite identisch mit der Transparentvorlage ist. Dadurch kommt der Vorteil des Transparentpapiers besonders zum Tragen. Vor der Bestückung werden alle Anschlußstellen der Leiterplatte, ggf. auch Einstellregler, mit Tuschefüller oder Spezial-Faserschreiber (zur Beschriftung von Plasten u. ä.) beschriftet. Dadurch erspart man sich Fehlbeschaltungen sowie das Hinzuziehen des Stromlaufplanes bzw. der Leiterplatten-Zeichnung.

J. Wunderwald

Tips zur rationellen Herstellung von Leiterplatten

Bei einfachen Schaltungen ist man oft geneigt, von einer Leiterplatte abzusehen und die Schaltung auf Lötösenleisten ö. ä. aufzubauen. Nach der folgenden Arbeitsweise ist es möglich, den zeitlichen Aufwand für eine Leiterplatte soweit zu verringern, daß sie jeder anderen Verdrahtungsvariante vorzuziehen ist. Vom Entwurf bis zur fertig bestückten Leiterplatte kommt man bei einfachen Schaltungen mit ein bis zwei Stunden aus. Der Leiterplatten-Entwurf wird grundsätzlich auf Transparentpapier gezeichnet. Auf eine Seite zeichnet man mit Bleistift die Leiterzüge. Dadurch kann man Korrekturen vornehmen, ohne die Linien der anderen Seite mit wegzuradieren. Ist die Einhaltung des 2,5-mm-Rasters erwünscht (was bei Leiterplatten für den Amateurbedarf m. E. nicht erforderlich ist) sowie bei Verwendung von IS, Tastenschaltern u. ä., wird bei der Zeichnung der Bauelemente-Seite Millimeterpapier untergelegt.

Nach Fertigstellung des Entwurfs zeichnet man die Bauelemente-Seite mit Tuschefüller, die Leiterseite mit Faserstift nach. Werden alle Bauelemente-Werte mit

eingetragen, braucht bei der Bestückung der Schaltplan nicht zu Hilfe genommen werden.

Bei der Herstellung von Leiterplatten nach vorhandenen Zeichnungen wird Leiterplatten- und Bestückungsseite von der Vorlage ebenfalls auf Transparentpapier übertragen, diesmal gleich mit Tusche oder Faserstift. Nach Übereinanderlegen der zugeschnittenen Leiterplatten und des Transparentpapiers (mit Klebeband fixieren) werden die Bohrungen gekörnt, anschließend die Leiterzüge mit Nitrolack gezeichnet. Der Lack ist nach 10 Minuten getrocknet und die Leiterplatte kann geätzt werden. Das Ätzen mit Eisen-III-Chlorid ist zu langwierig, außerdem muß das Bad bewegt werden. Auch Ammoniumpersulfat aus dem Amateur-Ätzsatz von Neuruppin ist unbefriedigend; der Autor hatte eine Packung, bei der es nach Stunden trotz Erwärmung zu keiner Ätzung kam!

Daher verwendete der Autor ausschließlich Salpetersäure, die teilweise in Drogenen erhältlich ist. Die Konzentration ist so zu wählen, daß der Ätzprozeß nach maxi-