

Transistorisierter Sinus- und Rechteckgenerator

H. JAKUBASCHK

Es wird ein transistorisierter Sinus-Tongenerator mit Rechteckzusatz beschrieben, der für Werkstattzwecke bestimmt und mit handelsüblichen Bauelementen leicht nachzubauen ist. Der Generator gibt in vier Bereichen eine Frequenz von 15 Hz...60 kHz als Sinus- und Rechteckschwingung ab. Beide Schwingungen sind gleichzeitig abnehmbar, wobei die Sinusschwingung von $0 \dots \approx 1 V_{eff}$ und die Rechteckschwingung von $0 \dots \approx 6 V_{ss}$ kontinuierlich regelbar ist. Das Impulslängenverhältnis (Tastverhältnis) der Rechteckspannung ist zusätzlich im Bereich 1:8...1:1...8:1 kontinuierlich regelbar. Der Sinus-Klirrfaktor liegt unter 1%.

Das Prinzip

Die Sinusschwingung wird mit einem direktgekoppelten dreistufigen Transistorverstärker nach dem Prinzip der Wien-Brücke [1] [2] erzeugt. Durch starke Gegenkopplung wird erreicht, daß der Eingang des Transistorverstärkers ausreichend hochohmig ist, um die Wien-Brücke nicht merklich zu belasten, und daß Änderungen der Betriebsspannung und Umgebungstemperatur in den praktisch vorkommenden Grenzen ohne Einfluß auf die Frequenzzeichnung bleiben.

Ein Problem beim Schaltungsentwurf eines solchen Generators ist im Hinblick auf die Bauelementauswahl die Art der Amplitudenstabilisierung. Häufig werden dafür entweder Heißeiter oder nichtlineare Widerstände in Form antiparallel geschalteter Dioden in einem Gegenkopplungsweig benutzt. Beide Lösungen haben entscheidende Nachteile. Heißeiter sind gewöhnlich zu träge, so daß entweder eine längere Einlaufzeit notwendig ist oder es zu Instabilitäten der Regelschaltung und „pendelnder“ Amplitude kommt. Die Anwendung von Dioden als nichtlineare Elemente im Regelzweig bedingt grundsätzlich eine Erhöhung des Klirrfaktors. Beide Verfahren sind für den werkstattmäßigen Nachbau und für Amateurzwecke weniger geeignet.

Eine bestmögliche Ausnutzung der Eigenschaften der Wien-Brücke ist bei Verwendung eines Kaltleiters im Regelzweig möglich. Der Generator konnte so dimensioniert werden, daß die Verwendung einer handelsüblichen Kleinglühlampe als Kaltleiter möglich wurde, womit die Bauelementenfrage für den Regelzweig gelöst ist und der damit aufgebaute Wien-Generator die bekannten vorteilhaften, den entsprechenden Röhrengeräten vergleichbaren Eigenschaften aufweist. Bei genauem Abgleich und Vermeidung merklicher Gleichlauffehler des Frequenz-Einstellreglers kann über den gesamten Frequenzumfang des Generators die Amplitudenschwankung kleiner als 1 dB und der Klirrfaktor kleiner als 1% gehalten werden.

Die Rechteckschwingung wird durch einen dem Sinusgenerator nachgesetzten Schmitt-Trigger gewonnen, dessen Be-

triebsspannung im Hinblick auf konstante Rechteckamplitude stabilisiert ist. Das Gerät wurde für eine Speisespannung von 24 V ausgelegt. Die Stromaufnahme beträgt für gleichzeitigen Betrieb von Sinus- und Rechteckgenerator insgesamt etwa 0,1 A, für den Sinusgenerator allein etwa 50 mA. Die Speisung kann vorteilhaft aus einer Reihenschaltung von sechs Flachbatterien je 4,5 V oder einer Reihenschaltung von Kleinakkus erfolgen. Auch die Verwendung eines einfachen stabilisierten Netztes ist möglich [3], dann muß jedoch auf gute Siebung geachtet werden. Eine Batteriespeisung erscheint deshalb und wegen des relativ geringen Strombedarfs vorteilhafter.

Schaltung des Sinusgenerators

Bild 1 zeigt die Gesamtschaltung des Generators. T_1 , T_2 und T_3 bilden zusammen mit der Wien-Brücke den Sinusgenerator. Die Grobwahl des Frequenzbereiches erfolgt durch Kondensatorumschaltung mit $S_{1a,b}$, die Frequenzfeineinstellung mit dem – mit Frequenzskala versehenen – Tandemregler $P_{1a,b}$. Die Bereiche überlappen sich geringfügig, so daß die Reglerendstellungen nicht restlos ausgenutzt zu werden brauchen. Gegen Ende des Regelbereiches mögliche Gleichlauffehler lassen sich mit P_4 und P_5 in gewissen Grenzen ausgleichen. Im Mustergerät wurde der Tandemregler mit zufriedenstellendem Ergebnis aus zwei typgleichen normalen Einzelpotentiometern (1-W-Drahtpotentiometer), die auf eine gemeinsame Achse gesetzt wurden, aufgebaut. Vorteilhafter ist die Verwendung eines speziellen Tandemreglers. Mit Rücksicht auf die Gleichlaufbedingung ist die Verwendung von Reglern mit linearem Widerstandsverlauf ratsam. Die dadurch nach hohen Frequenzen auftretende Zusammendrängung der Skaleneichung ist bei Verwendung einer ausreichend großen Skala und wegen der vorhandenen Bereichsüberlappung ohne Nachteil. Um am oberen Ende des NF-Bereiches die dort interessierenden Frequenzen besser einstellen zu können, wurde außerdem der Bereich d so gelegt, daß er mit dem vor-

angehenden reichlich überlappt. Mit der im Schaltbild angegebenen Dimensionierung ergaben sich die Bereiche:

- a = 15...150 Hz
- b = 150 Hz...1,5 kHz
- c = 1,5...15 kHz
- d = 6...60 kHz

Für Werkstattzwecke kann evtl. auf den Bereich d verzichtet werden. Das vereinfacht außerdem das Problem der Grenzfrequenz der Transistoren, womit für T_3 anstelle des sonst notwendigen HF-Leistungstransistors ein NF-Typ für mindestens 180 mW Belastbarkeit benutzt werden kann. Wird diese Lösung gewählt, so ist es im Hinblick auf die obere, dann bei 15 kHz liegende Frequenzgrenze anstelle der Verwendung eines 1-W-Transistors günstiger, einen 150-mW-Typ mit reichlich dimensioniertem Kühlblech zu verwenden (OC 821, OC 825, GC 121). Für Frequenzen über 15 kHz kommt für T_3 der Typ GF 140 in Betracht.

Der Verstärker ist dreistufig in Gleichstromkopplung aufgebaut, so daß auch bei tiefen Frequenzen keine Phasendrehungen auftreten können. Die großen Emittierwiderstände bewirken eine starke Gegenkopplung. Die Rückkopplung erfolgt über P_5 durch Auskopplung der NF-Spannung am Emittier von T_3 . Für den Generator-Rückkopplungskreis arbeitet T_3 in Kollektorschaltung. Die Ausgangsspannung wird am Kollektor von T_3 ausgekoppelt und über den Amplitudenregler P_6 abgegriffen. Am Ausgang wurde ein dreiteiliger Spannungsteiler angeordnet, der die eingestellte Ausgangsspannung um 20, 40 oder 60 dB zu reduzieren gestattet, so daß auch geringe Ausgangsspannungen im Millivoltbereich bequem einstellbar sind. Außerdem erfolgt eine Ausgangsspannungsmessung mittels 100- μ A-Instruments I und Diodenbrücke $D_{1...4}$. Hierauf kann zwar grundsätzlich verzichtet werden, wenn P_6 in „Volt Ausgangsspannung“ geeicht wird, jedoch erlaubt das Instrument eine Funktionskontrolle des Generators. Zusätzlich kann das Instrument mit einem doppelpoligen Umschalter zur Kontrolle der Speisespannung benutzt werden. Dabei wird das Instrument mittels Um-

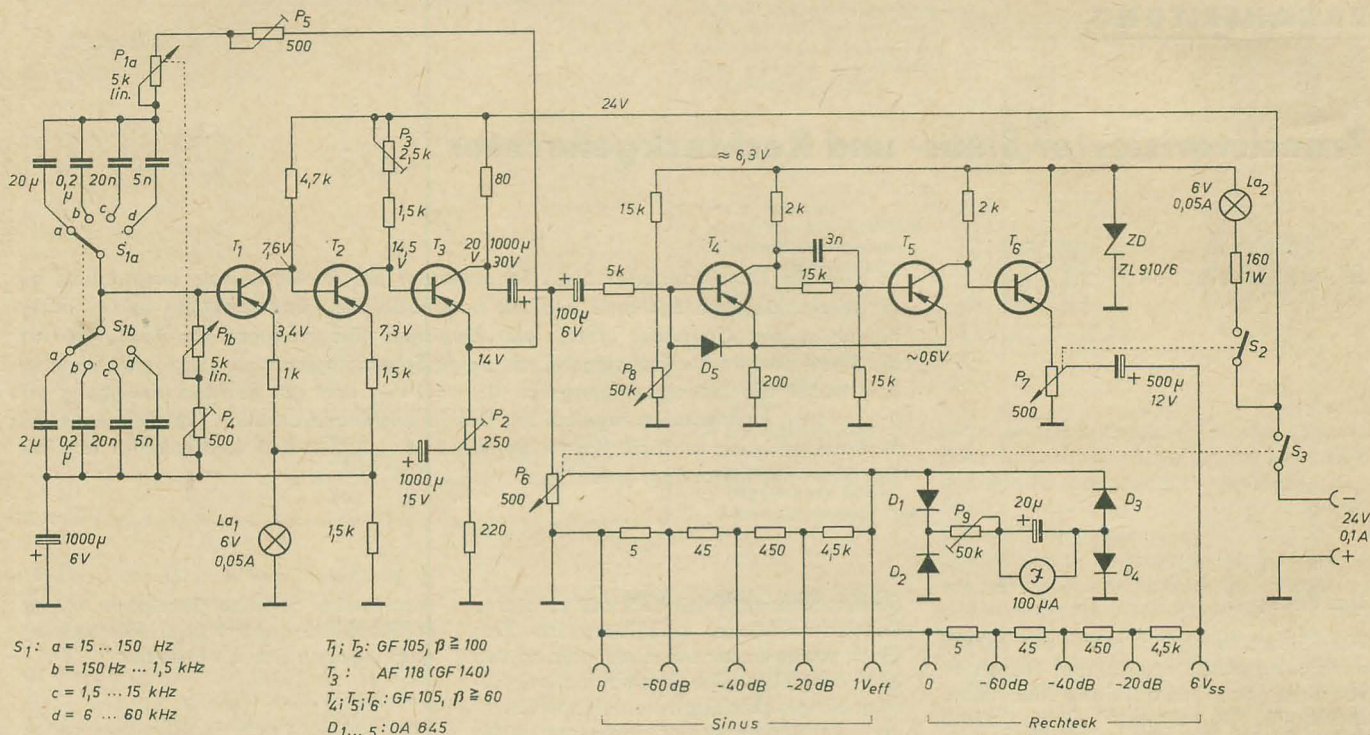


Bild 1: Gesamtschaltung des kombinierten Sinus- und Rechteckgenerators

schalter über einen Vorwiderstand von 240 k Ω an die Stromquelle gelegt. Außer der Rückkopplung über P_5 ist eine Gegenkopplung vom Emitter T_3 über P_2 auf die Emitterleitung von T_1 vorhanden. Der Emitterwiderstand von T_1 ist aufgeteilt in einen 1-k Ω -Festwiderstand und die als Kaltleiter zur Amplitudenstabilisierung wirkende Lampe La_1 . Dieser Lampe wird gleichzeitig die Ausgangs-NF-Spannung von P_2 zugeführt. Hat diese das Bestreben anzusteigen, so tritt an La_1 eine höhere NF-Spannung auf, der Widerstand von La_1 erhöht sich, und die Gegenkopplung wird dadurch stärker. Die Gesamtverstärkung verringert sich entsprechend, so daß dem Amplitudenanstieg entgegengewirkt wird. Die Daten dieser als Regelglied wirkenden Lampe sind entscheidend für die Wirksamkeit der Amplitudenstabilisierung, deshalb ist hier nur der angegebene Lampentyp 6 V 0,05 A verwendbar! Wegen der relativ stark streuenden Fertigungstoleranzen dieses Massenartikels kann es gelegentlich vorkommen, daß trotz sorgfältigen Abgleichs keine völlige Amplitudenkonstanz beim Durchdrehen von P_1 erreichbar ist. Man setzt dann für La_1 probeweise ein anderes Exemplar gleichen Typs ein. La_1 bleibt im Betrieb dunkel (!) — ein bei abgedunkeltem Raum bereits schwach erkennbares Glimmen weist auf falschen Abgleich von P_2 und P_3 hin! Bei einwandfreiem Abgleich stellen sich annähernd die im Schaltbild angegebenen Spannungswerte ein, wobei an La_1 nur etwa 0,1 V Gleichspannung auftreten. Es empfiehlt sich, den Hauptschalter S_3 mit dem Ausgangsspannungsregler P_6 zu koppeln. Anderenfalls kann es bei aufgedrehtem P_6 im Einschaltmoment von S_3

durch den Ladestromstoß des am Kollektor von T_3 liegenden großen Elkos zu unangenehmen Gleichspannungsstößen am Sinusausgang und am Instrument I kommen.

Schaltung des Rechteckgenerators

Der Rechteckgenerator ist ein Schmitt-Trigger (T_4, T_5) mit nachgeschalteter Kollektor-Ausgangsstufe T_6 [3]. Der 5-k Ω -Widerstand in der Basiszuleitung von T_4 verhindert eine Rückwirkung des in beiden Schaltzuständen verschiedenen großen Trigger-Eingangswiderstandes auf den Sinusausgang sowie die sonst wegen der vor dem Triggereingang auftretenden Verdrahtungskapazität mögliche Selbsterregung des Triggers. Mit P_8 kann in weiten Grenzen das Rechteck-Tastverhältnis durch Änderung der Triggervorspannung geregelt werden. Da der Trigger direkt vom Sinusgenerator angesteuert wird, hat die Rechteckspannung zwangsläufig und unabhängig vom eingestellten Tastverhältnis genau die Frequenz der Sinusspannung und ist mit dieser synchron. Auch für den Trigger müssen im Hinblick auf gute Flankensteilheit HF-Transistoren benutzt werden. Zur Entkopplung des Rechteckausgangs vom Trigger und um eine niedrige Ausgangsimpedanz zu erzielen, erfolgt die Auskopplung über T_6 . An P_7 ist dann die Rechteckspannung mit kontinuierlich regelbarer Amplitude abnehmbar. P_7 kann mit einem Oszillografen in V_{ss} geeicht werden. Behelfsmäßig kann diese Eichung auch folgendermaßen durchgeführt werden: P_7 wird vom Emitter T_6 abgetrennt und an den Regler eine Gleichspannung angelegt, die

15% geringer ist als die — zuvor zu messende — Trigger-Betriebsspannung der Zenerdiode ZD.

Am Schleifer P_7 wird nun mit hochohmigem Vielfachmesser für jede Reglerstellung die abfallende Gleichspannung gemessen und dieser Wert als V_{ss} -Eichung auf die P_7 -Skala aufgetragen. Die so erhaltene Skala gestattet später die Ablesung der eingestellten Impulsamplitude mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 5\%$. Da der Trigger nur etwa 6 V Betriebsspannung benötigt, wird diese mittels Zenerdiode aus der Betriebsspannung gewonnen. Der für die Zenerdiode ohnehin erforderliche Vorwiderstand wird hier teilweise durch La_2 gebildet. Damit ist ohne zusätzlichen Stromverbrauch eine Einschaltkontrolle für den Rechteckgenerator gegeben. D_5 im Triggereingang verbessert das Umschaltverhalten des Triggers bei extremen Tastverhältnissen und erweitert den Regelbereich von P_8 .

Abgleich und Inbetriebnahme

Zunächst werden im Sinusgenerator und anschließend im Rechteckgenerator die angegebenen Spannungswerte kontrolliert. Bei einwandfreier Funktion stellen sich die für $T_1 \dots T_3$ angegebenen Werte etwa bei Mittelstellung von P_3 ein. S_1 wird in Stellung b gebracht, P_1 auf etwa $\frac{1}{3}$ seines Wertes, P_2 steht zunächst am emitterseitigen Anschlag nach T_3 , so daß keine Schwingung erzeugt wird. Zur optimalen Einstellung ist ein Oszillograf unumgänglich. Er wird am Sinusausgang angeschlossen und nunmehr — P_6 voll aufgedreht — mit P_2 langsam bis zum Schwingeneinsatz geregelt. Die Ausgangs-

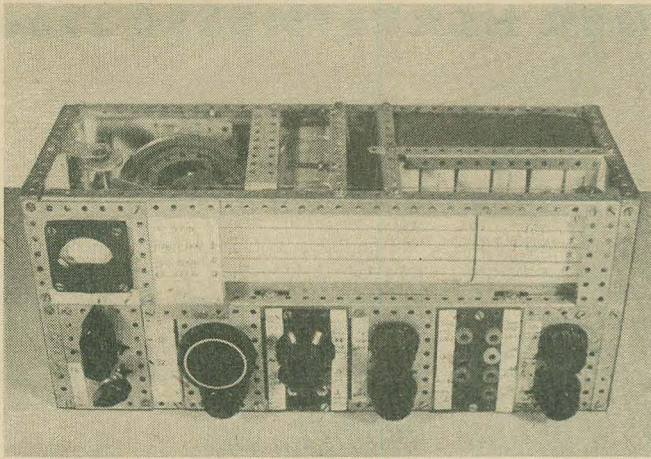


Bild 2: Das Mustergerät wurde mit Einzelteilen des Chassisbaukastens ER 10 der Fa. Reissmann, Dresden, aufgebaut. Links Ausgangsspannungsmesser, darunter Bereichsumschalter. Unter der Skala die Ausgangsspannungsregler für Sinus und Rechteck, rechts P_8 . Im Chassis rechts hinten der Batteriesatz. $P_{1a, b}$ werden über Seilzug angetrieben, links oben ist das Seilrad für die Frequenzregler sichtbar

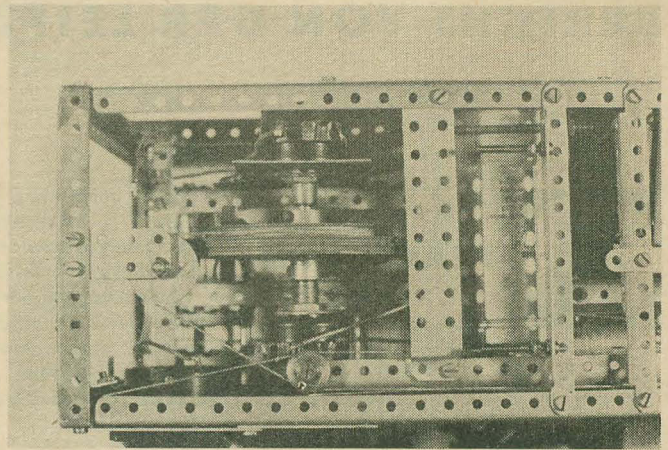


Bild 3: Für $P_{1a, b}$ wurden zwei einzelne lineare Drahtpotentiometer benutzt, die beiderseits des Seilrades auf gemeinsamer Achse angeordnet sind (im Foto ober- und unterhalb des Seilrades). Das Antriebsstahlseil ist nach Art industrieller Rundfunkgeräte-Abstimmungen geführt und treibt von der Achse des Bedienknopfes aus sowohl das Seilrad als auch den Skalenzüger ober- und unterhalb der Skala an. Der Züger hängt frei im Antriebsseil; ein Teil des Zeigerantriebs ist im Foto sichtbar

amplitude muß nun etwa bei $1 V_{eff}$ oder wenig darüber liegen. Man prüft nun, ob beim Durchdrehen von P_1 die Amplitude konstant bleibt. Zeigt sich am höherfrequenten Skalenende ein Amplitudenanstieg oder ein Aussetzen in allen vier Bereichen von S_1 , so ist fast immer ein Gleichlauffehler von $P_{1a, b}$ die Ursache. Restliche Gleichlauffehler am höherfrequenten Ende können mit P_4 bzw. P_5 – die zunächst in Mittelstellung stehen – ausgeglichen werden. Ergibt die spätere Frequenzzeichnung, daß die obere Bereichsgrenze nicht erreicht wird, so sind P_4 und P_5 zu verringern und die Gleichlaufkontrolle anschließend zu wiederholen.

P_2 und P_3 sind ggf. wechselseitig abzugleichen. P_2 soll nicht weiter zum masseseitigen Ende gedreht werden, als für sicheres Anschwingen auf allen Bereichen erforderlich ist. Die richtige Einstellung von P_3 überprüft man, indem probeweise P_2 so weit nach Masse gedreht wird, daß im Oszillografen eine einsetzende Abkappung der Sinusschwingung erkennbar wird. Ist P_3 richtig eingestellt, so beginnt die Abkappung bei beiden Halbwellen zugleich. Steht eine Klirrfaktormeßeinrichtung zur Verfügung, so wird P_3 auf geringsten Klirrfaktor eingestellt. Der Abgleich wird mit P_2 beendet. Bei richtigem Abgleich aller Trimmregler $P_{2...5}$ ist die Amplitude auf allen Bereichen über die ganze Skalenlänge konstant.

Der Rechteckgenerator bedarf keines besonderen Abgleichs. Man überzeugt sich von seiner Funktion durch oszillografische Kontrolle am Rechteckausgang, wobei erforderlichenfalls P_8 durch Ausmessen des Oszillogramms in Tastverhältnissen grob geeicht werden kann. P_9 wird schließlich durch Vergleich der Instrumentanzeige mit der am Sinusausgang gemessenen Ausgangsspannung so abgeglichen, daß je nach vorhandener Instrumententeilung eine bequeme Ablesung der Ausgangsspannung möglich ist.

Nach Abschluß aller Abgleicharbeiten kann die P_1 -Skala des Sinusgenerators in

Frequenzen geeicht werden. Hierzu ist entweder ein zweiter geeichter Tongenerator und Oszillograf erforderlich [5], oder man benutzt eine andere ausreichend genaue Frequenzmeßeinrichtung [3]. Damit wird die Skala von P_1 – für jeden Bereich getrennt – punktweise aufgenommen. Eine einzige Skala für alle vier Bereiche ist wegen der bei hohen Frequenzen kaum restlos vermeidbaren Phasendrehungen schwer möglich.

Der einwandfrei abgeglichene Generator ist im Temperaturbereich von $10 \dots 35^\circ C$ und innerhalb einer Speisespannung von $21 \dots 25 V$ praktisch frequenz- und amplitudenkonstant. Bei richtigem Abgleich von P_2 setzt er bei zu weit absinkender Betriebsspannung ganz aus, noch bevor es zu merklichen Frequenzfehlern kommt. Der Aufbau ist wegen der Niederohmigkeit der Schaltung unkritisch, jedoch sollte man insbesondere im Komplex der Wien-Brücke und im Schmitt-Trigger auf kürzestmögliche Leitungsführung achten. Die Elkos am Kollektor von T_3 und an P_2 sollten mit etwas Abstand von Metallteilen isoliert gehalten werden. Bei T_3 ist – je nach benutztem Transistortyp – auf evtl.

erforderliche Kühlmaßnahmen zu achten, da dieser Transistor mit etwa 180 mW Kollektorverlustleistung betrieben wird. Das gleiche gilt sinngemäß für die Zenerdiode. Die Bilder 2, 3 und 4 zeigen den mechanischen Aufbau.

Literatur

- [1] Rint, C.: Handbuch für HF- und E-Techniker, Band 1. Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin-Borsigwalde
- [2] Schmidt, R.: Schwingungserzeugung mit Elektronenröhren, Band 24 der Broschürenreihe „Der praktische Funkamateureur“. Deutscher Militärverlag, Berlin
- [3] Jakubaschk, H.: Das große Elektronikbastelbuch, Deutscher Militärverlag, Berlin
- [4] Intermetall-Schaltbeispiele, Ausgabe 1964
- [5] Jakubaschk, H.: Oszillografentechnik für Amateure, Teil II; Praxis der Oszillografie, Band 45 der Broschürenreihe „Der praktische Funkamateureur“. Deutscher Militärverlag, Berlin

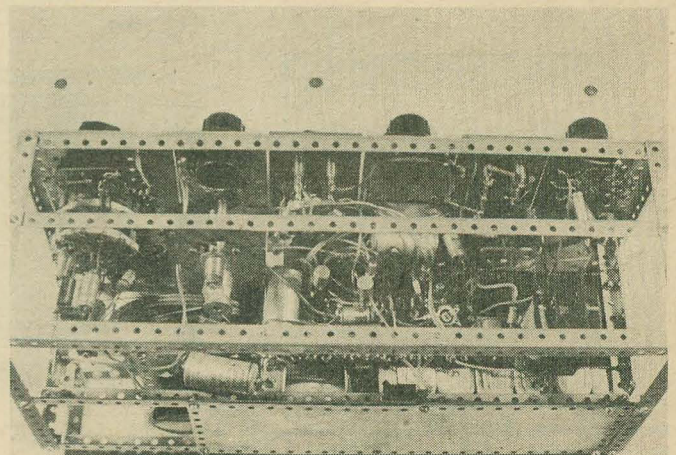


Bild 4: Blick in die Verdrahtung