

Die Neutralisation

Der folgende Aufsatz behandelt die Neutralisation von Röhren und Transistoren in einfacher Darstellungsweise, um Amateure und Anfänger in dieses wichtige Gebiet einzuführen. Weitere grundlegende Ausführungen hierzu enthalten die Funktechnischen Arbeitsblätter Rö 11 und Vs 83 sowie der zweite Band des Hilfsbuches für Hochfrequenztechniker von Limann-Hassel (beide im Franzis-Verlag erschienen).

Die Schwingneigung eines Verstärkers

Jeder Verstärker kann auch von selbst Schwingungen erzeugen, wenn von seinem Ausgang eine genügend große Spannung in der richtigen Richtung und zum richtigen Zeitpunkt (d. h. richtiger Phasenlage) nach vorn an den Eingang gelangt. Diesen Vorgang nennt man bekanntlich Rückkopplung. In Oszillatorschaltungen führt man diesen Zustand absichtlich herbei; in Verstärkerschaltungen tut man alles, um ihn zu verhindern.

Ein Verstärker soll die zugeführte Spannung möglichst unverfälscht verstärken. Das heißt, die Kurvenform der Ausgangsspannung soll genau der Form der Eingangsspannung entsprechen, lediglich die Amplituden sollen verschieden groß sein.

Nun könnte man durch eine genau bemessene und über den ganzen zu verstärkenden Frequenzbereich gleichmäßige Rückkopplung den Verstärkungsgrad kräftig erhöhen, und damit wäre eine Rückkopplung im Verstärker nicht grundsätzlich schädlich (vgl. FUNKSCHAU 1957, Heft 15, Seite 403).

Tatsächlich ist es jedoch äußerst schwierig, die Rückkopplung gleichmäßig herbeizuführen. Im Falle einer ungewollten Rückkopplung wird aber stets nur ein schmales Frequenzband bevorzugt rückgekoppelt und damit besonders verstärkt. Selbst wenn es noch nicht zu Selbsterregung reicht, würde dies in einem Verstärker zu unzulässigen Verzerrungen des zu verstärkenden Frequenzbandes führen. Man trachtet also danach, Rückkopplungen in Verstärkern völlig zu unterbinden.

Für diese Überlegungen spielt es keine Rolle, in welchem Frequenzbereich ein Verstärker arbeitet, ob bei Tonfrequenz oder im UKW-Bereich. Leider lassen sich jedoch nicht in allen Verstärkern Rückkopplungen vermeiden. Besonders bei den Höchsthäufigkeiten im Meter- und Dezimeterwellengebiet treten über die unvermeidliche innere Kapazität C_{ga} zwischen Gitter und Anode einer Röhre unerwünschte Rückkopplungen auf und bringen die Schaltung leicht zum Schwingen.

In solchen Fällen muß man neutralisieren. Das heißt, man muß zu der einen Rückkopplung eine zweite fügen, die eine gleich große, aber entgegengesetzte (gegenphasige) Spannung an den Eingang liefert. Dadurch heben sich die schädlichen Wirkungen auf.

Grundschialtung eines Verstärkers

Betrachten wir eine einfache Verstärkerschaltung mit einer Triode (*Bild 1*): Die Gleichspannungsversorgung kann bei der Betrachtung der Wechselspannungsvorgänge außer acht gelassen werden. Die Eingangs-Wechselspannung U_e erzeugt in der Röhre eine Stromänderung, die am Anodenwiderstand R_a wieder eine Spannungsänderung (das ist wiederum eine Wechselspannung) zur Folge hat. Über die Kapazität C_{ga} wird ein Teil davon auf den Eingang übertragen. Liegt diese Teilspannung in Richtung (oder in Phase) der Eingangsspannung, so wird der Verstärkungsgrad erhöht. Im andern Fall wird er erniedrigt; dann tritt Gegenkopplung ein.

Gewinnung der gegenphasigen Spannung

Bild 2 stellt eine Schaltung dar, bei der Eingangswiderstand R_e und Ausgangswiderstand R_a durch Schwingkreise gebildet werden. Über die innere Röhrenkapazität C_{ga} erfolgt die Rückkopplung. Um eine gegenphasige Spannung zu erhalten, kann man die Anodenspule nach Bild 3 in der Mitte anzapfen. An diese Anzapfung wird die Katode angeschlossen. Von der Anzapfung aus gesehen ist jetzt die am Kreis liegende Spannung (ganzer Pfeil) in zwei gleich große, aber entgegengesetzte Spannungsteile halbiert.

Man beachte: Die Gesamtspannung wirke zu einem bestimmten Zeitpunkt an der gesamten Wicklung, z. B. vom Punkt A zum Punkt E. Von der Anzapfung Z aus nach A gesehen wirkt die halbe Spannung auf Z hin. Von Z aus nach E gesehen wirkt die halbe Spannung von Z weg. Mit anderen Worten: Die Spannung zwischen Z und A ist gleich groß, aber um 180° phasenverschoben (gegenphasig) zur Spannung zwischen Z und E. Nun wird aber nur von der Spannung zwischen Z und A ein Teil über C_{ga} auf das Gitter rückgekoppelt. Nur diese Teilspannung liegt zwischen Anode und Katode. C_{ga} und der Eingangskreis bilden einen Spannungsteiler. Die rückgekoppelte Spannung zwischen Gitter und Katode wird um so größer, je höher die Impedanz des Kreises ist. Das ist bei der Abstimmung von Eingangs- und Ausgangskreis auf die gleiche Frequenz der Fall. Dann tritt die Selbsterregung am leichtesten ein.

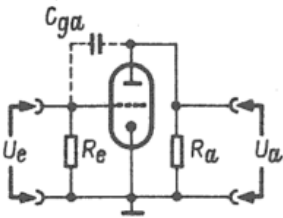


Bild 1. Rückkopplung über die Gitter-Anodenkapazität einer Röhre

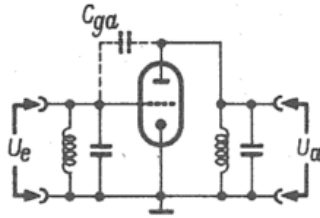


Bild 2. Röhre mit Schwingkreisen am Eingang und Ausgang

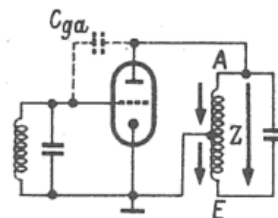


Bild 3. Der Ausgangskreis wird angezapft

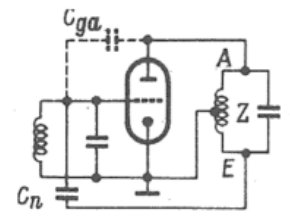


Bild 4. Über C_n wird eine Spannung zum Gitter zurückgeführt

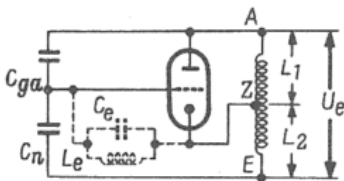


Bild 5. Ausgangsspule sowie C_{ga} und C_n bilden eine Brückenschaltung

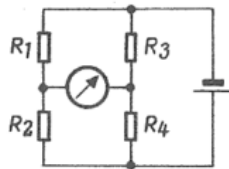


Bild 6. Prinzip einer Brückenschaltung

Legt man nun vom Punkt E aus nach Bild 4 einen Kondensator C_n an das Gitter, so wird diesem eine genau gleich große, aber entgegengesetzte Spannung wie über C_{ga} zugeführt, die jene erste Spannung kompensiert. Die Selbsterregung wird damit wirksam unterdrückt. Man hat neutralisiert!

Neutralisationsschaltung — Brückenschaltung

Eine kurze Überlegung macht klar, daß C_n ebenso groß sein muß wie C_{ga} , wenn die Spannung zwischen A und Z so groß ist wie die zwischen E und Z. Schiebt man die Anzapfung Z mehr nach E hin, dann wird die abgegriffene Gegenspannung geringer. C_n muß dafür in gleichem Maße durchlässiger, also vergrößert werden. Es handelt sich bei der Anordnung um eine Brückenschaltung, wie man leicht erkennt, wenn man zur besseren Übersicht den Eingangskreis nach Bild 5 umzeichnet und den Kondensator des Ausgangskreises weg läßt.

Die Strecke Gitter — Katode (und mit ihr der Eingangskreis) liegt in der Querverbindung (Diagonalen), die bei abgeglichenen Brücke stromlos wird. Dann kann U_a keine Spannung zwischen Gitter und Katode hervorrufen; eine Rückkopplung ist unterbunden.

Bei der normalen Wheatstoneschen Brücke (Bild 6) bestehen die vier Brückenarme aus ohmschen Widerständen. Für das gezeichnete Beispiel wäre die Brücke abgeglichen, wenn sich $R_1 : R_2$ wie $R_3 : R_4$ verhält. Im Fall der hier behandelten Röhren-Neutralisation sind die entsprechenden Impedanzen für R_1 bis R_4 einzusetzen.

$$\frac{RC_{ga}}{RC_n} = \frac{RL_1}{RL_2}$$

oder

$$\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_{ga}} \cdot \frac{2\pi \cdot f \cdot C_n}{1} = \frac{2\pi \cdot f \cdot L_1}{2\pi \cdot f \cdot L_2}$$

Daraus ergibt sich:

$$\frac{C_n}{C_{ga}} = \frac{L_1}{L_2}$$

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{ga}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1}{1} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_n} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_n}$$

C_n = Neutralisations-Kapazität

C_{ga} = Kapazität zwischen Gitter und Anode

L_1 = Spulenteil zwischen Anode und Katode

L_2 = Spulenteil zwischen Gitter und Katode

Die Gesamtschaltung

Der vereinfachten Brückenschaltung soll jetzt wieder die Gesamtschaltung gegenübergestellt werden. Alle Schaltelemente, einschließlich derer zur Gleichspannungsversorgung und der Röhrenkapazitäten, sind so gezeichnet, daß die Brückenordnung leicht erkennbar bleibt (Bild 7).

Man erkennt: Die Anoden-Katodenkapazität C_{ak} liegt eigentlich (transformiert) parallel zu C_a . C_{gk} liegt direkt parallel zu C_e . Der Kreis $L_e - C_e$ liegt in der Brückendiagonalen Gitter — Katode. Da die Neutralisationsspannung vom Anodenkreis entnommen wird, spricht man von Anoden-Neutralisation.

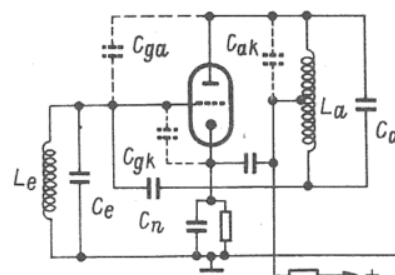


Bild 7. Vollständige Röhrenschaltung mit Neutralisationsbrücke

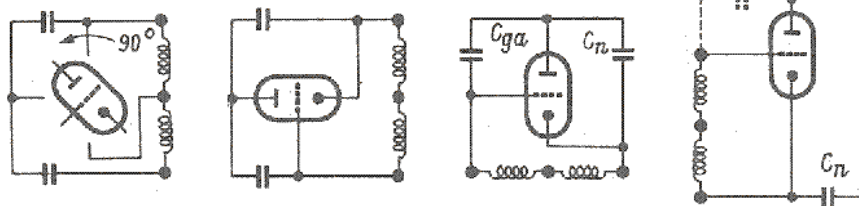


Bild 8. Die Röhren- Bild 9. Neue Lage der Bild 10. Die gesamte Schaltung
Anschlüsse werden Röhre
gedreht Bild 9 wurde nochmals um 90°
gedreht

Bild 11. Normale Darstellung der Schaltung Bild 10

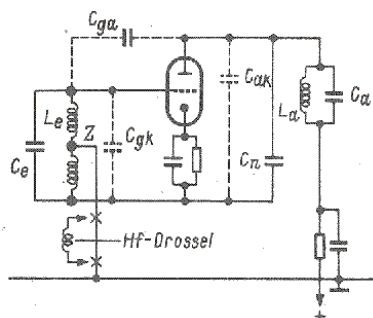


Bild 12. Vollständige Schaltung einer Röhre mit Gitter-Neutralisation

Die zweite, ebenfalls oft angewendete Art der Neutralisation ist die Gitter-Neutralisation. Hier wird die Neutralisationsspannung vom Gitterkreis entnommen. Die Gitter-Neutralisation geht aus der Anoden-Neutralisation dadurch hervor, daß man innerhalb der vier Brückenzweige aus C_{ga} , C_n und den beiden Teilen der Spule L die Röhre einfach um 90° dreht (Bild 8 bis 11). Die Strecke Gitter — Katode wird also von der einen in die andere Brückendiagonale gedreht. Auch in ihr muß bei abgeglichenen Brücke ein spannungsloser Zustand herrschen. Die Induktivität liegt danach gänzlich zwischen Gitter und Katode und stellt nunmehr die des Eingangskreises dar. Die vollständige Schaltung zeigt Bild 12.

Man erkennt: Die Gitter-Katodenkapazität liegt parallel zur Kreiskapazität im Eingang und kann diese auch vollständig ersetzen. C_{ak} liegt parallel zu C_n . Die Lage des Zapfpunktes Z ist so zu wählen, daß die Impedanzen der Spulenabschnitte sich zueinander ebenso verhalten wie die Impedanzen von C_{ga} und $C_n + C_{ak}$. Da aber das Verhältnis von C_{ga} zu C_n nicht mit einfachsten Mitteln festzustellen und C_n außerdem oft veränderbar ist, legt man Z gern über eine Drossel mit ziemlich unkritischem Induktivitätswert hoch. Der Anschlußpunkt Z der Drossel braucht dann bequemerweise nicht mit dem Nullspannungspunkt der Brückendiagonalen übereinzustimmen. Dieser stellt sich von selbst irgendwo in der Wicklung von L_e ein.

Neutralisationsdrossel

Schließlich gibt es noch eine gelegentlich angewendete Möglichkeit zur Neutralisation. Man legt einfach von der Anode zum Gitter eine Induktivität, die so bemessen ist, daß sie sich mit C_{ga} zu einem Schwingkreis ergänzt, der für die zu neutralisierende Frequenz in Resonanz ist. So entsteht ein Parallel-Resonanzkreis, der in der Art eines Sperrkreises die Rückwirkung von der Anode auf das Gitter stark vermindert. Selbstverständlich muß diese Neutralisationsdrossel L_n mit einem gegenüber C_{ga} genügend großen Kondensator in Reihe geschaltet werden, um die Anodenspannung abzuriegeln (Bild 13).

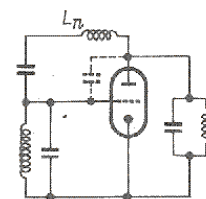


Bild 13. Schaltung mit Neutralisationsdrossel L_n

Neutralisationsschaltung - Oszillatorschaltung

Auf einen weiteren Umstand sei noch hingewiesen. Beim Betrachten von Bild 4 wird man unschwer feststellen, daß diese Schaltung eine große Ähnlichkeit mit einem Dreipunkt-Oszillator hat. Die Verwandtschaft (sie gilt auch für andere Neutralisationsschaltungen) scheint noch enger, wenn man bedenkt, daß der Eingangskreis für die Resonanzfrequenz wie ein ohmscher Widerstand wirkt und auch so gezeichnet werden könnte. In der Tat, wer sich mit UKW- Tunern befaßt, der weiß, daß ein solcher Tuner sowohl dann schwingt, wenn der Neutralisations-Kondensator zu klein, als auch wenn er zu groß eingestellt wird.

Neutralisation in Transistor-Verstärkerstufen

Vergleich der Arbeitsweise einer Röhre und eines Transistors

In einer Röhre wird der Elektronenstrom im Vakuum gesteuert. Zwischen den einzelnen Elektroden besteht meist nur eine reine Kapazität. Lediglich die Strecke Anode – Katode reagiert auf Spannungen, die an sie angelegt werden, entsprechend einem reellen Widerstand.

Im Transistor spielen sich die Steuerungsvorgänge in einem festen Stoff, einem Kristall, ab. Dabei werden Elektronen teils im Kristallgitter freibeweglich verschoben, wie es auch in einem metallischen Leiter der Fall ist, teils bewegen sie sich mehr in der Art der Ionenleitung gebunden von Atom zu Atom. Zwischen den einzelnen Elektroden bestehen außer vergleichsweise größeren Kapazitäten als bei der Röhre stets auch Widerstände, deren Größen nicht vernachlässigt werden dürfen.

Beim Transistor entspricht der Emitter der Katode, die Basis dem Gitter und der Kollektor der Anode. Durch die Röhre fließen die Elektronen von der Katode zur Anode. Der positive Pol der Batterie- oder Speisespannung U_b liegt an der Anode und der negative an der Katode. Durch den pnp-Transistor, der z. Z. meist verwendet wird, fließen die Elektronen umgekehrt, nämlich vom Kollektor zum Emitter, und der negative Pol der Batteriespannung liegt am Kollektor (Anode der Röhre).

Um eine Röhre zu größerem Stromfluß zu steuern, muß zwischen Gitter und Katode eine Spannung angelegt werden, deren positiver Pol am Gitter liegt. Da hier jedoch immer eine negative Vorspannung vorhanden ist, bewirkt die Steuerspannung nur einen sehr kleinen kapazitiven Ladestrom, jedoch keinen Wirkstrom (jedenfalls im in Frage kommenden Arbeitsbereich und unterhalb der Grenzfrequenz). Der ohmsche Widerstand zwischen Gitter und Katode ist praktisch unendlich hoch. Die Steuerung erfolgt ohne Leistungsaufwand.

Um einen Transistor zu größerem Stromfluß zu steuern, ist zwischen Basis und Emitter eine Spannung anzulegen, die mit ihrem negativen Pol an der Basis liegt. Dabei fließt jedoch ein gewisser reeller Strom und der Eigenwiderstand des Kristalls macht zur Steuerung einen Leistungsaufwand nötig. Auch hier ist meist eine Vorspannung vorhanden, die jedoch so gerichtet ist (Minus an Basis), daß bereits ein Strom fließt. Bei der Röhre liegt also die Vorspannung gegen die öffnende Steuerspannung, beim Transistor liegt sie in gleicher Richtung.

Die Verstärkerwirkung

Sowohl bei der Röhre als auch beim Transistor erzeugt die zu verstärkende Eingangs-Wechselspannung eine Stromänderung, die am Außenwiderstand R_a wieder eine Spannungsänderung bewirkt. Demnach verläuft der Verstärkungsvorgang bei Röhre und Transistor weitgehend gleich. Es sind lediglich die Spannungspolaritäten vertauscht (Bild 14 und 15).

Vergleich der inneren Kapazitäten und Widerstände von Röhre und Transistor

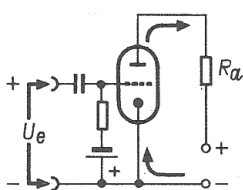


Bild 14. Steuerung einer Röhre

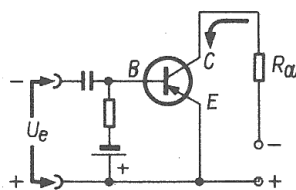


Bild 15. Steuerung eines Transistors

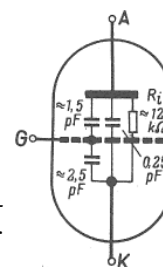


Bild 16. Ersatzschaltung einer Röhre

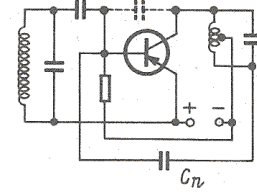
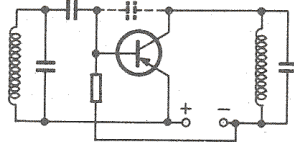
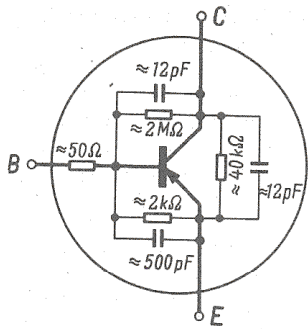


Bild 18. Transistor-Zf-Stufe

Bild 17. Ersatzschaltung eines Transistors

Bild 19. Neutralisierte Transistor-Zf-Stufe

Bild 20. In Reihe mit dem Neutralisationskondensator C_n wird ein Widerstand geschaltet

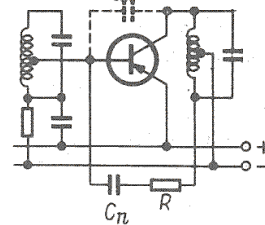
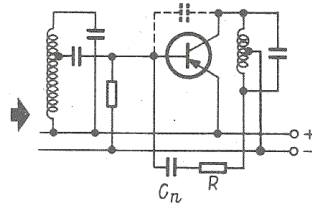


Bild 21. Die Basis ist an eine Spulenanzapfung zu legen

In Bild 16 und 17 sind die inneren Kapazitäten und Widerstände einer Röhre (EC 92) und eines Transistors (GFT 45) einander gegenübergestellt, wie man sie durch Messung ermitteln kann. Man sieht, der Transistor hat wesentlich mehr innere Schaltglieder. Bemerkenswert ist die im Vergleich zur Röhre sehr große Eingangskapazität, die dem ohmschen Eingangswiderstand parallel geschaltet ist. Derartige Verbindungen eines Wirkwiderstandes und eines kapazitiven (oder auch induktiven) Blindwiderstandes nennt man Scheinwiderstände, Impedanzen oder auch komplexe Widerstände. Bekanntlich tritt an solchen Widerständen, wenn man sie an Wechselspannung legt, eine Phasenverschiebung auf, d. h., der durch sie fließende Strom folgt in seiner Größe und Richtung nicht mehr genau und ohne zeitlichen Unterschied der ihn erzeugenden Spannung. Beim Transistor besteht also zwischen Steuer Spannung und Steuerstrom eine Phasenverschiebung, die weder der einer reinen Kapazität noch der eines rein ohmschen Widerstandes entspricht. Bei der Röhre kann die Kapazität C_{ga} zur Selbsterregung führen, beim Transistor kommt dafür die Kapazität C_{be} zwischen Kollektor und Basis in Frage.

Der eigentliche Neutralisationsvorgang

Da die Verstärkungsweise bei Röhre und Transistor weitgehend gleich ist, müssen auch die Methoden, eine Selbsterregung zu verhindern, sehr ähnlich sein. Bild 18 zeigt eine Schaltung mit je einem Schwingkreis im Eingang und Ausgang eines Transistors, was einer Zf-Verstärkerstufe gleichkommt. Sie würde zur Selbsterregung führen (vgl. Bild 3). Um das zu unterbinden, kann man die Schaltung in Übereinstimmung zu Bild 4 ändern und man erhält Bild 19. Dabei wäre jedoch nicht Rücksicht genommen auf den wesentlich niedrigeren, leistungsverbrauchenden und komplexen Eingangswiderstand des Transistors. Der Leistungsverbrauch wird verringert, wenn man die Basis nach Bild 20 oder 21 an eine Anzapfung des Schwingkreises legt. Der niedrige Eingangswiderstand des Transistors wird dann hinauftransformiert, er erscheint vom Kreis her gesehen größer und dämpft dadurch weniger. Außerdem erfolgt durch die transformatorische Anpassung von Eingangs- und Resonanzwiderstand eine wesentlich günstigere Leistungsübertragung und damit eine höhere Verstärkung.

Der komplexe Eingangswiderstand des Transistors wird sehr einfach berücksichtigt, indem man einen ohmschen Widerstand mit dem Neutralisationskondensator in Reihe schaltet. Bei passender Bemessung beider Schaltglieder erhält die neutralisierende Gegenspannung die richtige Größe und die richtige Phasenlage zu der über die Kollektor-Basis-Kapazität übertragenen Selbsterregungsspannung. Die Werte R_n und C_n lassen sich berechnen (vgl. FUNKSCHAU 1960, Heft 12, Seite 312), doch werden hierbei höhere Ansprüche an die mathematischen Kenntnisse gestellt. Für den Praktiker, der sich zum Studium der Verhältnisse selbst ein einzelnes Gerät bauen will, ist es einfacher, die Werte auszuprobieren. Er kann sich zunächst ungefähr an Werte halten, die er Industrieschaltungen entnimmt.

Die endgültige Prinzipschaltung

Eine vollständige Zf-Verstärkerstufe mit Ankopplungs- und Anpassungswicklung für die nächstfolgende Stufe hätte dann etwa eine Prinzipschaltung nach *Bild 22*. Es leuchtet ein, daß man die Neutralisationsspannung auch mit Hilfe einer getrennten Wicklung dem Kreis entnehmen kann. Dann entfällt die Anzapfung des Schwingkreises. Als zweite Wicklung kann man die ohnehin notwendige Ankopplungswicklung der nächsten Stufe verwenden, die somit gleichzeitig zwei Aufgaben erfüllt. Selbstverständlich ist dabei auf den richtigen Wickelsinn zu achten. Damit erhalten wir eine Schaltung nach *Bild 23* oder *24*. Beim Studium der verschiedenen Industrieschaltungen können wir feststellen, daß man von dieser letzteren Schaltungsmöglichkeit oft Gebrauch macht.

Auch bei den Röhrenschaltungen achte man auf die verschiedenen Abwandlungsmöglichkeiten. So wurde in der *FUNKSCHAU* 1960, Heft 21, Seite 523 eine industrielle Neutralisations-Schaltung gezeigt. Wird die Darstellung nach *Bild 7* bzw. *Bild 12* darauf angewendet, so erhält man *Bild 25*. Die neutralisierende Gegenspannung wird hier durch Anzapfung der Kapazität gewonnen. Die damit verwandte Oszillatorschaltung ist der Colpitts-Oszillator.

Praktische Anwendung

Zum Schluß sei dem weniger erfahrenen Leser sehr empfohlen, sich mit der Neutralisation praktisch auseinanderzusetzen. Im Fall der Röhrenneutralisation ist der Selbstbau eines UKW-Tuners günstig. Das ist überaus reizvoll, lehrreich und (entgegen einer weitverbreiteten Meinung) nicht übermäßig schwer. Auch der finanzielle Aufwand ist gering. Die Schaltung im *Telefunken-Laborbuch I*, Seite 279, *Bild 7*, ist dafür sehr geeignet. Sie ist nicht kritisch und alle Werte sind dort genau angegeben. Nur wäre vielleicht (nach Erfahrungen des Verfassers) von der Anode ein Kondensator (etwa 5... 10 pF) nach Masse zu legen, damit die Schwingspannung nicht zu groß wird. Der Kopplungskondensator zur Rückkopplungswicklung ist dann um das gleiche Maß zu verkleinern. Die Katodenkombination ist nicht unbedingt nötig. Die Neutralisation für die Zf-Spannung wird über den Spannungsteiler C 11 — C 12 und die Drossel L 3 in die selbstschwingende Mischtriode eingeführt. Wenn die Schaltung arbeitet, kann sie durch eine Vorverstärkerstufe erweitert werden, für deren Ausgestaltung man sich an die Schaltung auf Seite 272, *Bild 1*, des gleichen Buches halten kann. Sie ist für die Eingangsfrequenz neutralisiert.

Um die Neutralisation von transistorisierten Stufen zu studieren, ist es am einfachsten, sich einen der Bausätze für Transistor-Super zu kaufen, wie sie von Fachfirmen angeboten werden. Die Selbstherstellung so kleiner Zf-Filter ist zu schwierig. Falls es nicht bereits für die betreffende Schaltung vorgesehen ist, sind die Neutralisationsglieder als Trimmer auszuführen.

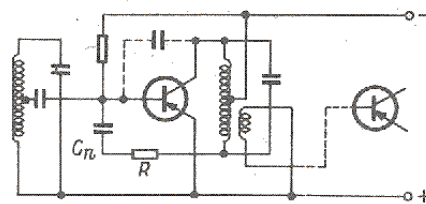


Bild 22. Andere Art der Basisschaltung

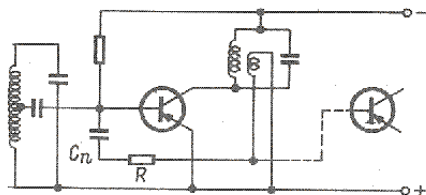


Bild 23. Die Ankopplungsspule des folgenden Transistors dient als Neutralisationswicklung

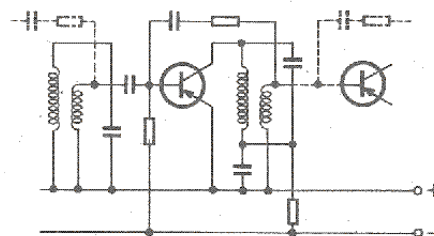


Bild 24. Vollständige neutralisierte Transistor-Zf-Stufe

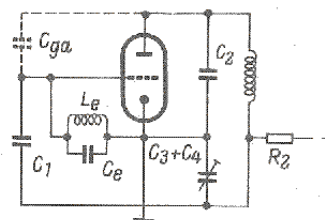


Bild 25. Neutralisierte Triode (Neutrode) in einer Zf-Stufe mit kapazitiver Auskopplung der neutralisierenden Spannung