

## Neutralisationsschaltungen

### Sicherheit gegen Selbsterregung sowie Stabilität in Hf- und Zf- Stufen

Hf- bzw. Zf-Stufen mit je einem Schwingkreis im Eingang und im Ausgang können bei zu hoher Verstärkung infolge innerer Rückkopplung zur Selbsterregung kommen. Man bleibt also mit der Verstärkung um einen Sicherheitsfaktor  $\gamma$  unter dem Wert, für den ein Selbstschwingen auftreten könnte. Für Hf-Eingangsstufen wird hierzu vielfach gefordert, dass es selbst bei nicht angeschlossener Antenne nicht zu Selbsterregung kommen darf.

Der **Sicherheitsfaktor**  $\gamma$  ist das Quadrat des Verhältnisses der Spannungsverstärkung, bei der Selbsterregung auftritt, zur tatsächlich vorgesehenen Verstärkung.

Auf die Selbsterregung hat es einen Einfluss, daß die innere Rückkopplung einer mit Schwingkreisen im Ein- und Ausgang arbeitenden Röhrenstufe nicht phasenrein ist. Das bewirkt nämlich Resonanzverschiebungen und ändert die Form der Gesamt-Durchlaßkurve. An diesen Phasenabweichungen ist der Steilheits-Phasenwinkel beteiligt. Er sollte somit für Trioden ab 70MHz und für Pentoden schon ab 25MHz berücksichtigt werden. Mit der Steilheit  $S$ , einer (stets nacheilenden) Steilheitsphase  $|\varphi_S|$  und einem wirksamen Gitter-Anoden-Blindleitwert, nämlich dem nach Neutralisation noch wirksamen positiven oder negativen Rest  $\omega C_{gaw}$ , erhält man als **höchstzulässige Spannungs-Verstärkung**:

$$V_{\max} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi \pm |\varphi_S|}{4} \pm \frac{|\varphi_S|}{2}\right)} \cdot \sqrt{\frac{S}{|\omega C_{gaw}| \gamma}}$$

Hierin gilt das Pluszeichen in der Klammer unter dem ersten Bruchstrich für einen positiven Wert (also einen Rest) der Gitter-Anoden-Kapazität. Das Minuszeichen gehört zu einer Überkompensation, also zu einem induktiven Rest-Blindleitwert, wofür die Selbsterregungsgefahr besonders groß ist.  $|\varphi_S|$  ist dabei stets der Absolutwert (siehe Beispiel).

### Zahlenbeispiele

1. Pentodenvorstufe mit EF80 für UKW:

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi \cdot 100\text{MHz} = 6,3 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1} \\ S &= 7 \text{ mA/V} \quad \varphi_S = -27^\circ \quad C_{gaw} = 0,008 \text{ pF} \end{aligned}$$

( $C_{gaw}$  hier =  $C_{ga}$  + Fassungs- und Schaltkapazität).

Mit  $\gamma = 4$  bei angeschlossener Antenne erhält man als höchstzulässige Spannungsverstärkung:

$$\begin{aligned} V_{\max} &= \frac{1}{\cos\left(45^\circ + \frac{27^\circ}{2}\right)} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{-3}}{6,3 \cdot 10^8 \cdot 0,008 \cdot 10^{-12} \cdot 4}} \\ &\approx \frac{1}{\cos 58,5^\circ} \cdot 19 \approx 37 \end{aligned}$$

Für  $\varphi_S \rightarrow 0$  geht die Formel in die allgemeine bekannte über:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2S}{|\omega C_{gaw}| \cdot \gamma}} \quad (1)$$

Positives und negatives  $C_{gaw}$  haben dann gleich großen Einfluß. Liegen am Eingang und Ausgang der Stufe statt Einzelkreise zweikreisige Bandfilter, so muss  $\gamma > 4$  gewählt werden, falls die Schaltung auch bei Wegnahme oder starkem Verstimmen des Eingangfilter-Primärkreises bzw. des Ausgangfilter-Sekundärkreises noch stabil bleiben soll.

2. Zf-Pentodenstufe mit EF 89 für 10,7 MHz:

$$\begin{aligned}\omega &= 2\pi \cdot 10,7 \text{ MHz} = 67 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \\ S &= 3,85 \text{ mA/V}; \varphi_S \text{ vernachlässigbar klein} \\ C_{gaw} &= 0,002 \text{ pF}\end{aligned}$$

Mit Rücksicht auf Form und gute Einstellbarkeit der Zf-Durchlaßkurve ist hier ein sehr hoher Wert für  $\gamma$  zu wählen:  $\gamma = 10$ .

Damit wird:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,85 \cdot 10^{-3}}{67 \cdot 10^6 \cdot 0,002 \cdot 10^{-12} \cdot 10}} = 76$$

### Verringern der wirksamen Gitter-Anoden-Kapazität

Die höchstzulässige Verstärkung  $V_{\max}$  kann, wie eben dargetan - bei im allgemeinen festliegenden Werten für  $S$ ,  $\omega$ ,  $\varphi_S$  und  $\gamma$  - nur durch Verringern von  $C_{gaw}$  gesteigert werden. Besonders für hohe Frequenzen ist mit Trioden lediglich hiermit eine hinreichende Verstärkung zu erzielen.

Für eine gegebene Röhre liegt deren Gitter-Anoden-Kapazität  $C_{ga}$  an sich fest. Dennoch läßt sich die Wirksamkeit dieser Kapazität und damit der Wert von  $C_{gaw}$  herabsetzen. Eine als praktisch brauchbar erprobte Möglichkeit bietet die Brückenschaltung. Mit ihr gelingt es,  $C_{ga}$  in hohem Maße zu neutralisieren. Auch in selbstschwingenden Mischstufen ist Neutralisation mit Brückenschaltungen notwendig, um unerwünschte Verkopplungen zu beseitigen und schädliche Kapazitäten unwirksam zu machen.

### Brückenschaltung

Eine Brückenschaltung besteht aus vier Widerstandszweigen. Man nutzt den für die Hf- oder Zf- Spannung hierbei erzielbaren Gleichgewichtszustand aus. Dieser ist damit gegeben, dass eine in einer Brückendiagonale auftretende Wechselspannung  $U_1$  in der anderen Brückendiagonale keine Wechselspannung  $U_2$  zur Folge hat (**Bild 1**).

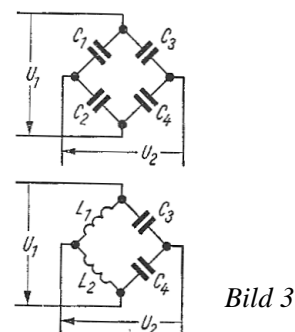
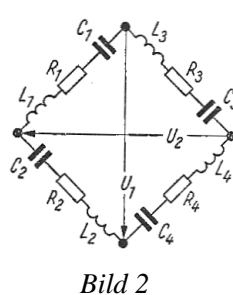
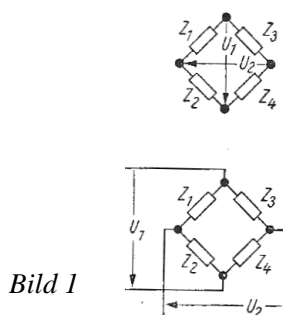
Gleichgewicht einer Wechselstrom-Brücke nach Bild 1 bedeutet allgemein:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} - U_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = 0$$

woraus sich ergibt: 
$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (2)$$

Jeder Widerstandszweig der Brücke kann aus Wirkwiderstand  $R$ , Induktivität  $L$  und Kapazität  $C$  bestehen. Frequenzunabhängigkeit der Beziehung (2) verlangt für die Schaltung nach **Bild 2**, daß im einzelnen gilt:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{C_4}{C_3} \quad (3)$$



Neutralisationsbrücken enthalten im allgemeinen gemäß **Bild 3** vier Kapazitäten oder je zwei Induktivitäten und Kapazitäten. Damit vereinfacht sich die Bedingung (3) zu

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{C_4}{C_3} \quad \text{bzw.} \quad \frac{L_1}{L_2} = \frac{C_4}{C_3} \quad (4)$$

Sind die Verlustwinkel und damit die Wirkwiderstände  $R_1 \dots R_4$  der Brückenglieder nicht vernachlässigbar klein, so ergibt sich bei Verzicht auf den Abgleich dieser Widerstände gemäß (3) eine mehr oder weniger starke Trübung des Minimums.

Für hohe Frequenzen müssen auch die Leitungsinduktivitäten der vier Zweige in den Abgleich nach (3) einbezogen werden, wenn eine Trübung in einem großen Frequenzbereich vermieden sein soll.

Im folgenden werden zunächst die für die Hf- und Zf- Verstärkerstufe wichtigsten und am häufigsten angewandten Neutralisationsschaltungen behandelt.

### Steuergitter-Neutralisation

Mit der Steuergitter-Neutralisation erreicht man im Idealfall ein Verhindern der Rückwirkung der Ausgangswechselspannung auf den Eingangs-Schwingkreis, also auf den Gitterkreis. Bei Steuergitter-Neutralisation, die üblicherweise einfach Gitter- Neutralisation genannt wird, ist der Gitterkreis aufgeteilt (**Bild 4**). Damit ergibt sich mit der Kapazität  $C_N$  eine Brückenschaltung. Diese ist in **Bild 5** herausgezeichnet.

So treten die Wechselspannung  $U_1$  am Eingangskreis in der einen und die Ausgangswechselspannung  $U_2$  in der anderen Brücken-Diagonale auf. Für Brückengleichgewicht sind beide Spannungen voneinander unabhängig.

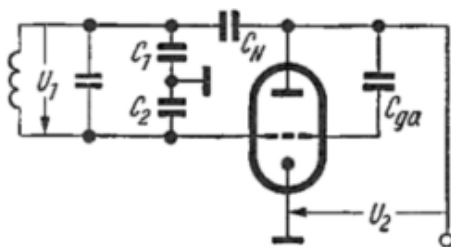


Bild 4

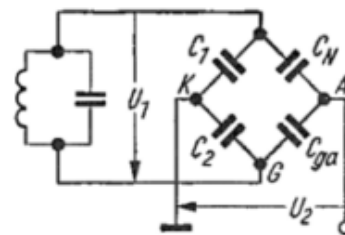


Bild 5

Der durch  $C_1$  und  $C_2$  gebildete Brückenweig kann auch durch zwei Induktivitäten oder durch eine angezapfte Induktivität ersetzt werden. Kapazitive Aufteilung ist jedoch gebräuchlicher. Sie läßt sich genauer einhalten.

In der Schaltung nach Bild 5 herrscht Gleichgewicht, wenn durch Einstellen der Neutralisierungskapazität  $C_N$  erreicht wird:

$$\frac{C_{ga}}{C_N} = \frac{C_2}{C_1} \quad \text{bzw.} \quad C_N = C_{ga} \cdot \frac{C_1}{C_2} \quad (5)$$

Dabei sind für alle Kapazitäten vernachlässigbar kleine Verlustwinkel vorausgesetzt. Mit nicht vollständig abgeglicherer Brücke ergibt sich als wirksame Gitter-Anoden-Kapazität:

$$C_{gaw} = C_{ga} - C_N \cdot \frac{C_2}{C_1} \quad (6)$$

Das Verhältnis der wirksamen Gitter-Anoden-Kapazität zu ihrem tatsächlichen Wert nennt man **Neutralisationsfaktor** ( $N_n$ ). Hierfür gilt:

$$N_n = \frac{C_{gaw}}{C_{ga}} = 1 - \frac{C_N}{C_{ga}} \cdot \frac{C_2}{C_1} \quad (7)$$

$N_n$  gibt an, um welchen Faktor die wirksame Gitter-Anoden-Kapazität bei nicht vollständiger Neutralisation (Festneutralisation) geringer ist als die tatsächliche Gitter-Anoden-Kapazität. In der Praxis erzielt man als

## Neutralisationsfaktor

mit **einstellbarer Neutralisation** Werte von 1:100 bis 1:10000 und  
 mit **Festneutralisation** (zu +/- 2,5% Kapazitätstoleranz in den Brückenzweigen)  
 nur 1:10 bis 1:20 im ungünstigsten Fall.

Die Neutralisations-Brückenschaltung hebt die sonst über  $C_{ga}$  erfolgende Verkopplung zwischen Eingangs- und Ausgangsschwingkreis im Idealfall völlig auf. Selbst damit wird jedoch die Rückwirkung der Anodenwechselspannung auf die Strecke Gitter-Kathode im allgemeinen nicht vollständig beseitigt! Es verbleibt über den aus  $C_{ga}$  und  $C_2$  gebildeten kapazitiven Spannungsteiler eine frequenzunabhängige Gegenkopplung, die den wirksamen inneren Widerstand  $R_{iw}$  der Röhre gegen den tatsächlichen Wert  $R_i$  herabsetzt. Hierzu gilt mit Bild 4:

$$\frac{1}{R_{iw}} = \frac{1}{R_i} + S \cdot \frac{C_{ga}}{C_2} \quad (8)$$

Um diesen Einfluss gering zu halten, darf  $C_2$  also nicht zu klein gewählt werden.

## Bremsgitter-Neutralisation

Auch hier wird im Idealfall die Rückwirkung der Ausgangswechselspannung auf den Eingangskreis aufgehoben, nicht jedoch die Rückwirkung der Ausgangswechselspannung auf die Strecke Gitter-Kathode.

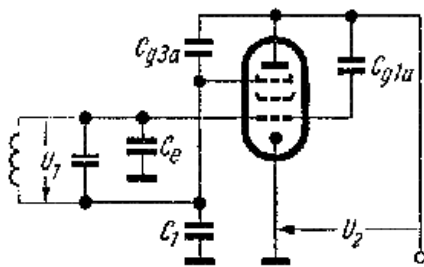


Bild 6

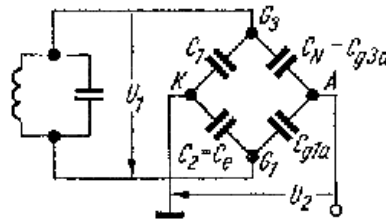


Bild 7

Die durch **Bild 6** veranschaulichte Bremsgitter-Neutralisation kommt naturgemäß nur für Pentoden in Betracht. Hier dient als Neutralisierungskapazität  $C_N$  die Kapazität zwischen Bremsgitter und Anode  $C_{g3a}$  (**Bild 7**). An die Stelle von  $C_2$  tritt dabei die Eingangskapazität  $C_e$  der Röhre. Diese beiden Kapazitäten liegen ebenso fest wie die Gitter-Anoden-Kapazität. Zum Einstellen des Brückengleichgewichtes bleibt also lediglich die zwischen Bremsgitter und Masse einzufügende Kapazität  $C_1$  frei wählbar. Hierfür verlangt das Brückengleichgewicht (Bild 7):

$$C_1 = C_e \cdot \frac{C_{g3a}}{C_{g1a}} \quad (9)$$

Es gilt für den Neutralisationsfaktor:

$$N_n = 1 - \frac{C_{g3a}}{C_{g1a}} \cdot \frac{C_e}{C_1}$$

Für  $N_n$  sind somit die Abweichungen der Röhrenkapazitäten  $C_{g3a}$ ,  $C_{g1a}$ ,  $C_e$  bestimmend, falls  $C_1$  mit +/- 2,5% festliegt.

## Anoden- und Schirmgitter-Neutralisation

Zum Zwecke der Anoden-Neutralisation wird statt des Gitterkreises der Anodenkreis aufgeteilt (**Bilder 8 und 9**). Die Gleichungen (5) bis (7) gelten auch hier. Der Einfluss auf den Innenwiderstand ist hier wesentlich geringer als bei Steuergitter-Neutralisation. Gleichung (8) gilt somit nicht. Bei dieser Neutralisation wird nämlich im Idealfall unmittelbar die Rückwirkung der Ausgangswechselspannung auf

die Gitter-Kathoden-Strecke verhindert.

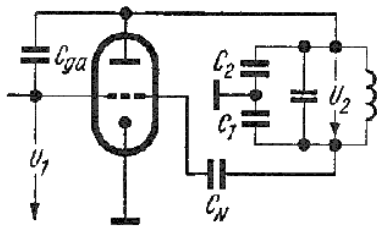


Bild 8

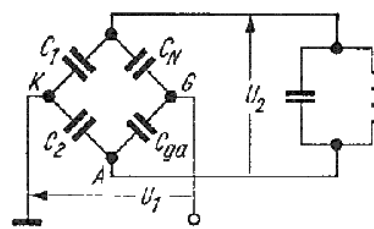


Bild 9

Ein Spezialfall der Anodenneutralisation ist die Schirmgitter-Neutralisation (**Bilder 10 und 11**). Als Neutralisationskapazität  $C_N$  dient hier die Kapazität zwischen Steuer- und Schirmgitter ( $C_{g1g2}$ ). Die Kapazität

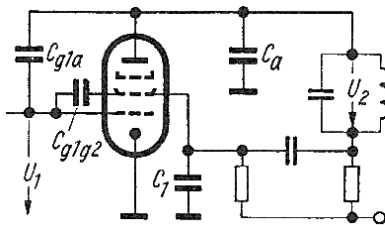


Bild 10

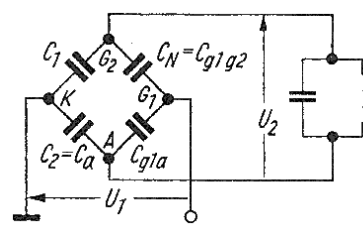


Bild 11

$C_2$  wird gleich der Ausgangskapazität  $C_a$ . Die zwischen Schirmgitter und Masse zu legende Kapazität  $C_1$  bemisst man zwecks Abgleich so:

$$C_1 = C_a \cdot \frac{C_{g1g2}}{C_{g1a}}$$

Der Wert des Neutralisationsfaktors wird bei fester Neutralisation - wie bei Bremsgitterneutralisation - durch die Toleranzen der Röhrenkapazitäten ( $C_a$ ,  $C_{g1a}$ ,  $C_{g1g2}$ ) bestimmt.

### Gitterbasis-, Anodenbasis- und Zwischenbasisschaltung

Die bisher behandelten Zusammenhänge gelten - außer für Kathodenbasisschaltung - grundsätzlich auch für Gitterbasis- und Anodenbasisschaltung. An Stelle der Gitter-Anoden-Kapazität  $C_{ga}$  sind für Gitterbasisschaltung die Kapazität  $C_{ak}$  (Anode-Kathode) sowie für Anodenbasisschaltung die Kapazität  $C_{gk}$  (Gitter-Kathode) in Gleichung (1) einzusetzen. Neutralisiert wird gegebenenfalls nach Gleichung (5) bis (7).

Die in den **Bildern 12 und 13**, sowie **14 und 15** dargestellten Zwischenbasisschaltungen können durch eine zu  $C_{ak}$  zwischen Anode und Kathode parallel geschaltete Kapazität  $C_N$  neutralisiert werden.

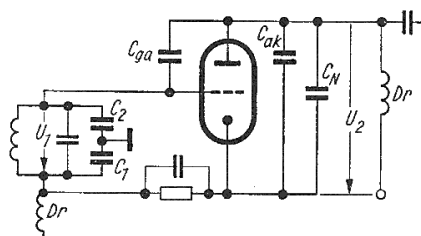


Bild 12

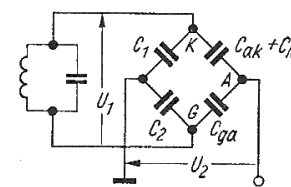


Bild 13

Bei kapazitiv aufgeteiltem Gitterkreis (Bilder 12 und 13) gilt für Brückenabgleich:

$$\frac{C_N + C_{ak}}{C_{ga}} = \frac{C_1}{C_2} \quad \text{oder} \quad C_N = \frac{C_1}{C_2} \cdot C_{ga} - C_{ak}$$

Die Dämpfung der Kapazität  $C_1$  durch den Gitterbasis-Eingangswiderstand  $\left(\frac{1}{S}\right)$  trübt bei kapazitiver Teilung das Minimum um so weniger, je größer  $C_1$  ist.

Bei induktiv aufgeteiltem Gitterkreis (**Bilder 14 und 15**) gilt mit  $x =$  Anzapfverhältnis, vom kathodenseitigen Ende des Schwingkreises gerechnet, für Brückenabgleich:

$$\frac{C_N + C_{ak}}{C_{ga}} = \frac{1-x}{x} \quad \text{oder} \quad C_N = \frac{1-x}{x} \cdot C_{ga} - C_{ak}$$

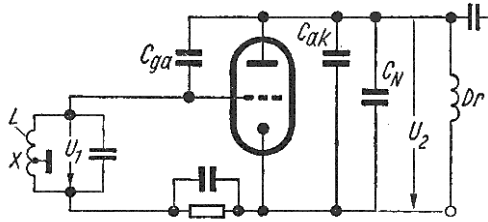


Bild 14

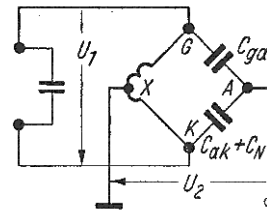


Bild 15

Mit einem bestimmten Anzapfverhältnis  $x_0$  tritt Selbstneutralisation der Schaltung durch die Röhrenkapazitäten ein (in Gleichung (12)  $C_N = 0$ ):

$$x_0 = \frac{C_{ga}}{C_{ga} + C_{ak}}$$

Das bedeutet für die EC92 den Wert  $x_0 = 0,86$ , also nahezu Gitterbasisbetrieb.

Quelle:

TELEFUNKEN-LABORBUCH  
Band 1

5. Ausgabe 1962, Seiten 286 - 292