

((Vorspann))

Der Gleichlauf im Superhet

Es ist üblich, zur Berechnung des Gleichlaufes im Überlagerungsempfänger drei Sollfrequenzen festzulegen, bei denen die Oszillatorfrequenz mit der Empfangsfrequenz genau die Zwischenfrequenz ergibt. Zur *Berechnung* der Serien- und Parallelkapazitäten der Schwingkreise wird dann eine Funktion dritten Grades notwendig, die in der Praxis schwierig zu handhaben ist. Im folgenden soll nun eine wesentlich leichtere Gleichlaufrechnung gezeigt werden. Diese wird dadurch ermöglicht, dass nur zwei Sollfrequenzen beliebig gewählt werden, während die dritte als geometrisches Mittel der beiden Randfrequenzen eingeführt wird.

((Einleitung))

Beim Flohmarktstöbern entdeckte ich einige alte Zeitschriften der „FUNK-TECHNIK“. Es handelte sich um eine „Zeitschrift für das gesamte Elektro-, Radio und Musikwarenfach“, worin sehr viele Anregungen praktischer- aber auch theoretischer Art zu finden sind. Ich staunte nicht schlecht, als ich einen Artikel fand, der sich mit dem Problem des Gleichlaufes im Superhet befasste und das auch noch in einer leicht verständlichen mathematischen Darstellungsweise. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die mathematischen Herleitungen nicht „von Pappe“ sind und schon einiges mehr als nur Grundlagenwissen in der Mathematik verlangen. Dennoch sollen sie hier wiedergegeben werden. Es sollen auch nur die wesentlichen Schritte dargestellt werden. Im Zeitalter des Taschenrechners bzw. PC lassen sich so auf dieser Grundlage Rechenprogramme erstellen, mit denen man die Serien- bzw. Parallelkondensatoren der Schwingkreise im Mehrbereichsempfänger auf elegante Art und Weise für jeden beliebigen Frequenzbereich ermitteln kann.

Die Betonung liegt dabei auf „Mehr-*BEREICHs*-empfänger“. Die Bandbreite der Empfangsbereiche sollte mindesten 2 MHz betragen, ansonsten lohnt der Aufwand für Berechnung und den späteren Abgleich nicht.

Für diejenigen, die sich nicht der Mühe unterziehen möchten ein Programm zu schreiben, stelle ich gern eine Excel-Tabelle zum downloaden und für die private Nutzung zur Verfügung: tubecenter@aror.de Es müssen hier lediglich noch die relevanten Werte in der Eingabematrix eingetragen werden.

(Haupttext)

Ein wenig Theorie des Schwingkreises

Die Kapazitätsänderung und Frequenzvariation eines Schwingkreises sind in folgender Weise voneinander abhängig:

$$\frac{f_o^2}{f_u^2} = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \quad (1)$$

f_o = obere Grenzfrequenz des Bereiches

C_{\min} = kleinste Kapazität

f_u = untere Grenzfrequenz des Bereiches

C_{\max} = größte Kapazität

Beim Superhetprinzip wird im allgemeinen zur Erzeugung der Zwischenfrequenz die Differenz aus Eingangs- und Oszillatorfrequenz benutzt, also ist $f_z = f_o - f_e$. Der Frequenzbereich für den Oszillator ist also stets kleiner als der des Eingangskreises. Um nun mit einem gegebenen (vorhandenen) Drehkondensator den Frequenzbereich eines Schwingkreises einzuengen und somit auf ein Band zu beschränken, hat man nun zwei Möglichkeiten:

1. man schaltet dem Schwingkreis einen Parallelkondensator C_p zu:

$$((\text{Bild 1})) \quad \frac{f_o^2}{f_u^2} = \frac{C_p + C_{\max}}{C_p + C_{\min}} \quad (2)$$

2. oder man schaltet dem Schwingkreis einen Serienskondensator C_s zu:

$$((\text{Bild 2})) \quad \frac{f_o^2}{f_u^2} = \frac{\frac{C_s * C_{\max}}{C_s + C_{\max}}}{\frac{C_s * C_{\min}}{C_s + C_{\min}}} \quad (3)$$

Aus den Gleichungen (2) und (3) lässt sich nun C_p bzw. C_s errechnen. Beide Schaltungsvarianten ergeben jedoch nur einen *Zweipunktgleichlauf* (nämlich für f_u bzw. f_o). Dreipunktgleichlauf ist erst möglich, wenn Parallel- und Serienskondensator zusammen eingeschaltet werden. Dann gilt:

$$((\text{Bild 3})) \quad \frac{f_o^2}{f_u^2} = \frac{C_p + \frac{C_s * C_{\max}}{C_s + C_{\max}}}{C_p + \frac{C_s * C_{\min}}{C_s + C_{\min}}} \quad (4)$$

In dieser Gleichung treten nun zwei Unbekannte C_p und C_s auf, zu deren Ermittlung noch ein zweiter Ausdruck erforderlich ist. (Anmerkung: Eine Gleichung mit zwei unbekanntem lässt sich nur dann lösen, wenn man auch zwei von einander unabhängige, aber in Beziehung stehende Gleichungen hat).

Dazu wird ein weiteres Frequenzverhältnis, das ebenfalls den Wert f_o^2/f_u^2 hat, eingeführt. Natürlich können dann nicht mehr die Grenzkapazitäten C_{\max} und C_{\min} eingesetzt werden (die sind bereits vergeben in Gl. (4)), sondern beide Frequenzintervalle müssen innerhalb der Gesamtkapazitätsänderung des Drehkondensators liegen.

((Bild 4))

Angenommen, es seien die obere und untere Randfrequenz f_1 und f_3 gegeben. Die mittlere Frequenz f_2 gemäß unserer obigen Vereinbarung ergibt sich dann zu:

$$f_2 = \sqrt{f_1 * f_3} \quad (5)$$

Die zugehörigen Drehkondensatorwerte sind dann C1, C2, C3. Es gilt dann für jeweils zwei Frequenzen und die zugehörigen Kapazitäten:

$$\frac{f1^2}{f2^2} = \frac{Cp + \frac{C2 * Cs}{C2 + Cs}}{Cp + \frac{C1 * Cs}{C1 + Cs}} \quad (6)$$

$$\frac{f2^2}{f3^2} = \frac{Cp + \frac{C3 * Cs}{C3 + Cs}}{Cp + \frac{C2 * Cs}{C2 + Cs}} \quad (7)$$

(vergleiche (4)). Aus diesen beiden Gleichungen können Cp und Cs errechnet werden und man erhält nach einer, zugegebenermaßen nicht ganz einfachen Umformung folgenden Ausdruck:

$$Cs = \frac{C1C2f3^2(f1^2 - f2^2) + C2C3f1^2(f2^2 - f3^2) - C1C3f2^2(f1^2 - f3^2)}{C1f1^2(f2^2 - f3^2) + C3f3^2(f1^2 - f2^2) - C2f2^2(f1^2 - f3^2)} \quad (8)$$

Es ist nach der „Sortierung“ der einzelnen Elemente auffallend, das die Ausdrücke Cn*Cm und fn²-fm² vorkommen. Zur Vereinfachung der weiteren Rechnungen kann man nun diese Ausdrücke ersetzen (Substitution, in der Mathematik häufig anzutreffende Verfahrensweise) und man erhält:

$$\begin{aligned} F1 &= f1^2 - f2^2 & K1 &= C1 * C2 \\ F2 &= f2^2 - f3^2 & K2 &= C2 * C3 \\ F3 &= f1^2 - f3^2 & K3 &= C1 * C3 \end{aligned}$$

Diese Ausdrücke setze man nun in Gleichung (8) ein:

$$Cs = \frac{K1F1fo3^2 + K2F2fo1^2 - K3F3fo2^2}{F2Ce1fo1^2 + F1Ce3fo3^2 - F3Ce2fo2^2} \quad (9)$$

Nun kann auch der Parallelkondensator berechnet werden, denn Cs ist bekannt. Man erhält zwei Gleichungen (von denen eine zur Proberechnung herangezogen werden sollte):

$$Cp = \frac{Cs}{F1} * \left(\frac{C2f2^2}{C2 + Cs} - \frac{C1f1^2}{C1 + Cs} \right) \quad (10)$$

$$Cp = \frac{Cs}{F2} * \left(\frac{C3f3^2}{C3 + Cs} - \frac{C2f2^2}{C2 + Cs} \right) \quad (11)$$

Zur Berechnung der notwendigen Induktivität kann man die Werte der mittleren Sollfrequenz heranziehen, und es ist:

$$L = \frac{10^{12}}{4P_i^2 * f^2 * \left(C_p + \frac{C_2 * C_s}{C_2 + C_s} \right)} \quad (12)$$

Die praktischen Werte werden in kHz, pF und µH eingesetzt. Die Gleichungen liefern dann auch wegen ihres symmetrischen Aufbaus kHz, pF und µH. Man kann sich also das „Hantieren“ mit Potenzen sparen, ein nicht zu unterschätzender Vorteil beim Rechnen mit dem Taschenrechner!

Die Berechnung:

Zur Veranschaulichung des gesamten Rechenganges sei die Berechnung des Schwingkreises einer Superhetmischstufe durchgeführt. Es wird der Mittelwellenbereich (525 kHz ... 1605 kHz) ausgewählt. Die Bereichs- und Kapazitätsgrenzen werden mit

$$f_u = 520 \text{ kHz} \quad C_{\max} = 500 \text{ pF}$$

$$f_o = 1615 \text{ kHz} \quad \text{und} \quad C_{\min} = 20 \text{ pF}$$

festgelegt. Die Zwischenfrequenz sei $f_z = 467 \text{ kHz}$.

Gewöhnlich werden die Drehkondensatoren C_{\max} und C_{\min} als Zwei- oder Mehrgangtypen hergestellt. Es sollten daher handelsübliche Typen verwendet werden. Im o.g. Rechenmodell (EXCEL-Tabelle) lassen sich diese Parameter variieren.

Nach Gleichung (1) erhält man für die Frequenzvariation des Eingangskreises

$$V_f^2 = \frac{f_o^2}{f_u^2} = \frac{1615^2}{520^2} = \frac{9,65}{1} = 9,65$$

Anmerkung: Korrekt ist unter der Frequenzvariation der Ausdruck $V_f = \frac{f_o}{f_u}$ zu verstehen ! (siehe auch [1], S. 121.)

Entsprechend erhält man die Kapazitätsvariation zu

$$V_c = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \frac{500}{20} = \frac{25}{1} = 25$$

Die Kapazitätsvariation des Eingangskreises muss also verkleinert werden! Dies geschieht durch den Paralleltrimmer C_t , der gleichzeitig auch den Einfluss der Verdrahtungs-, Spulen- und Eingangskapazität der aktiven Bauelemente (gleich ob Röhre, Transistor oder FET) ausgleicht. Seine Größe berechnet sich zu

$$C_t = \frac{f_u^2 * C_{\max} - f_o^2 * C_{\min}}{f_o^2 - f_u^2} = \frac{520^2 * 500 * 1610^2 * 20}{1610^2 - 520^2} = 35,52 \text{ pF}$$

Die Kapazitätsvariation des Eingangskreises ergibt sich nun zu

$$V_c = \frac{C_{\max} + C_t}{C_{\min} + C_t} = \frac{500 + 35,52}{20 + 35,52} = 9,65$$

$V_f^2 = V_c$, was ja die Absicht war! Wegen der vorhandenen Schaltkapazitäten ist der tatsächliche Wert allerdings kleiner.

Die notwendige Induktivität des Eingangskreises errechnet man sich nun nach (12) mit der größten Kapazität (C_{\max}) und der niedrigsten Frequenz (f_u)

$$L_e = \frac{10^{12}}{4 \pi^2 * f_u^2 * (C_{\max} + C_t)} = \frac{10^{12}}{4 \pi^2 * 520^2 * (500 + 35,90)} = 174,93 \text{ } \mu\text{H}$$

Nun kommen wir zur Berechnung der Lage der Sollpunkte. Ihre Lage wählt man 10% bis 20% der Bandgrenzen. In unserem Beispiel ergibt sich (gewählt !)

$$\# (10\% f_o + f_o) \quad \searrow \quad f_{e1} = 1453,5 \text{ kHz}, \quad f_{o1} = f_{e1} + f_z = 1920,5 \text{ kHz}$$

$$\# (20\% f_u * f_u) \quad \searrow \quad f_{e3} = 624,0 \text{ kHz}, \quad f_{o3} = f_{e3} + f_z = 1091,0 \text{ kHz}$$

Anmerkung: Die Wahl der Frequenzen sollte so erfolgen, dass sich möglichst keine „krummen“ Werte (Kommastellen!) ergeben. Die bereits erwähnte EXCEL-Tabelle erleichtert die Auswahl, da man nun schnell durch probieren zum Ziel gelangt.

Die mittlere Oszillatorfrequenz errechnet man nun aus Gleichung (5) zu

$$f_{o2} = \sqrt{1920,5 * 1091} = 1447,5 \text{ kHz}$$

Hieraus lässt sich nun natürlich auch die zugehörige Eingangsfrequenz errechnen

$$f_{e2} = f_{o2} - f_z = 980,5 \text{ kHz}$$

Die zugehörigen Drehkondensatorwerte (des Eingangskreises) errechnen sich nun wie folgt

$$C_{e1} = \frac{10^{12}}{4 \pi^2 * f_{e1}^2 * L_e} - C_t = \frac{10^{12}}{4 \pi^2 * 1453,5^2 * 174,93} - 35,52$$

$$C_{e1} = 33,02 \text{ pF}, \quad C_{e2} = 115,10 \text{ pF}, \quad C_{e3} = 336,37 \text{ pF}$$

Anmerkung: Der Wert des Paralleltrimmers C_t wird abgerechnet, da nur die Stellung des Drehkondensators für die weitere Rechnung von Interesse ist!

Nun zur Berechnung der Hilfsgrößen für die folgende Substitution, die keine weiteren Schwierigkeiten bereiten sollte:

$$\begin{aligned} K1 &= Ce1 * Ce2 = 33,02 * 115,10 = 3.800,99 \\ K2 &= Ce2 * Ce3 = 115,10 * 336,37 = 38.716,74 \\ K3 &= Ce1 * Ce3 = 33,02 * 336,37 = 11.107,86 \end{aligned}$$

Für die Oszillatorfrequenzen erhalten wir dann:

$$\begin{aligned} F1 &= fo1^2 - fo2^2 = 1920,5^2 - 1447,5^2 = 1.593.054,75 \\ F2 &= fo2^2 - fo3^2 = 1447,5^2 - 1091^2 = 904.984,50 \\ F3 &= fo1^2 - fo3^2 = 1920,5^2 - 1091^2 = 2.498.039,25 \end{aligned}$$

Nicht beeindruckt lassen von diesen etwas „futuristischen“ Zahlen. Sie werden uns das weitere Rechnen bedeutend erleichtern! Beim „Eintippen“ in den Taschenrechner sollten man aber schon aufpassen... Nun können wir nach Gleichung (9) den Serienkondensator des Oszillatorkreises berechnen und wenn dieser bekannt ist auch nach Gleichung (10) den Paralleltrimmer. Zur Probe wiederholen wir die Rechnung nach Gleichung (11) – sie sollte den selben Wert für Cp liefern.

$$C_s = \frac{3.800,99 * 1.593.054,75 * 1091,00^2 + 38.716,74 * 904.984,50 * 1920,5^2 - \dots}{904.984,50 * 33,02 * 1920,5^2 + 1.593.054,75 * 336,37 * 1091,00^2 - \dots} \dots$$

$$\dots \frac{11.107,86 * 2.498.039,25 * 1447,5^2}{2.498.039,25 * 115,10 * 1447,5^2}$$

$$\underline{C_s = 537,79 \text{ pF}}$$

$$C_p = \frac{537,79}{1.593.054,75} * \left(\frac{115,10 * 1447,5^2}{115,10 + 537,79} - \frac{33,02 * 1920,5^2}{33,02 + 537,79} \right)$$

$$\underline{C_p = 52,67 \text{ pF}}$$

(Die Proberechnung mit Gleichung (11) nicht vergessen!)

Anmerkung: Der tatsächliche Wert des Paralleltrimmers ist abzüglich der Schaltungskapazitäten zu verstehen, also stets *kleiner* als berechnet und man setzt ihn zweckmäßiger Weise aus einer Festkapazität und entsprechendem Trimmer zusammen ! Gleiches gilt für Cs.

Nun fehlt lediglich noch die Induktivität des Oszillatorkreises, die nach Gleichung (12) berechnet werden kann. Es ist die mittlere Oszillatorfrequenz fo2 zu verwenden!

$$L_o = \frac{10^{12}}{4 * Pi^2 * 1447,5^2 * \left(52,67 + \frac{115,10 * 537,79}{115,10 + 537,79} \right)}$$

$$\underline{L_o = 81,97 \text{ }\mu\text{H}}$$

Sie seien hier in Tabelle 1 noch einmal zusammengestellt:
((Tabelle 1))

Unter Verwendung der EXCEL-Tabelle kann man auf diese Weise die interessierenden, frequenzbestimmenden Werte des Bereichssupers festlegen. Auch wenn man keinen PC zur Verfügung hat ist eine Lösung mittels Taschenrechner recht einfach möglich, wenn man sich an das gezeigte Schema hält.

Der Abgleich geschieht nun in der Praxis wie üblich mit :

- dem Paralleltrimmer C_p auf die hohe Sollfrequenz
- der Induktivität L_\emptyset auf die mittlere Sollfrequenz
- dem Serientrimmer C_s auf die niedrige Sollfrequenz

und das im mehrfachen Wechsel (gegenseitige Beeinflussung).

(Nachwort)

Der hier wiedergegebene Artikel soll verdeutlichen, dass der Amateur bereits mit einfachen Mitteln die notwendigen Berechnungen für den Bau von hochwertigen Bereichsempfängern durchführen kann. Er sollte sich aber das dafür notwendige Rüstzeug beschaffen, das oft schon in der Literatur gefunden werden kann. Es gilt: keine Angst vor großen Formeln. Die hier gezeigten Berechnungen wurden 1948 mit dem Rechenschieber und Logarithmentafel (wer kann so was noch?) durchgeführt...

Ich hoffe, dass mir keine Fehler in der Darstellung bzw. Berechnung unterlaufen sind.

Zum Abschluss sei in Bild 5 noch eine Schaltung für einen KW-Bandempfänger mit BFO angegeben [2]. Die Zwischenfrequenz wird hier allerdings durch das keramische Filter vorgegeben. Eventuell verwendet man umschaltbare Bandfilter für unterschiedliche Selektion. Zum Üben kann man die Berechnungen an dieser Schaltung durchführen!

((Bild 5))

((Literaturangaben))

((Buch))

[1] Schubert, K.H., Das große Radiobastelbuch, Verlag Sport und Technik 1962, S. 118-126

[2] E.-J. Haberland, Dreibandempfänger mit integrierten Schaltkreisen, FUNKAMATEUR 4/1980, S. 194-196

((Zeitschriftenbeitrag))

Möller, C., Der Gleichlauf im Superhet, FUNK-TECHNIK, Berlin Nr. 5/1948, S. 110-111

((Tabellen))

Tabelle 1

Frequenzen (kHz)	Eingang	Oszillator
520		
	624	1091
	980,5	1447,5
	1453,5	1920,5
1615		
Induktivitäten (μH)	174,92	81,97
Kapazitäten (pF)		
Ct/Cp	35,52	52,67
Cs		537,79

((Bilder))

Bild 1: Schwingkreis mit Parallel-Kondensator

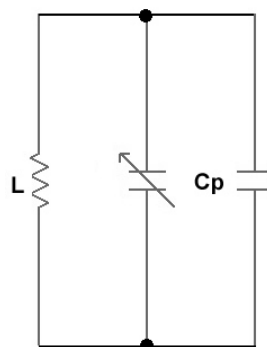


Bild 2: Schwingkreis mit Serien-Kondensator

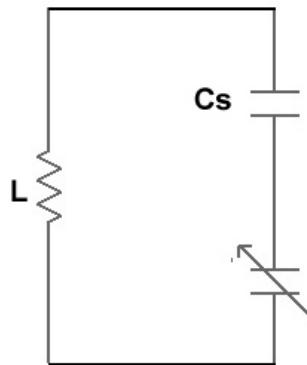


Bild 3: Schwingkreis mit Parallel- und Serienkondensator

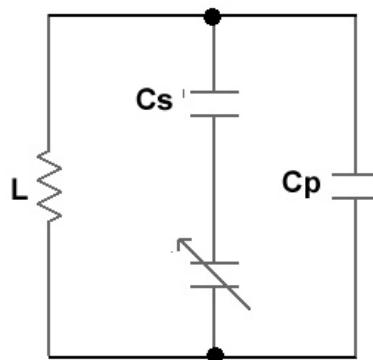


Bild 4: Prinzipschaltung eine Röhrenmischers

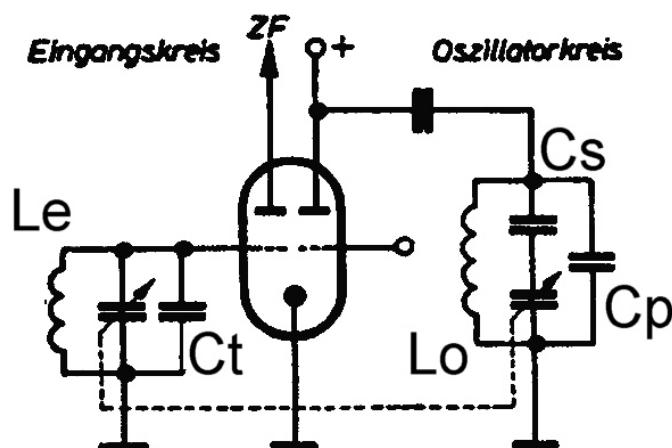


Bild 5: Bandempfänger mit IC:

