

Ergänzung zum Beitrag „Gleichlauf“ in FA 7/07, S. 734

An dieser Stelle wie versprochen einige Details zur Berechnung des Gleichlaufs.

■ Zweipunktgleichlauf mit Serienkondensator

Im Beitrag wurde lediglich das Ergebnis für die Dimensionierung des Oszillatorkreises mit Serienkondensators gemäß Bild 2 genannt. Zu diesem gelangt man über den Ansatz

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

sowie Auflösen der mit dem Symbol „||“ angedeuteten Serienschaltung des Drehkondensators mit C_s . Das führt nach einiger Zwischenrechnung auf:

$$C_s = \frac{f_o^2 - f_u^2}{f_u^2 / C_{\min} - f_o^2 / C_{\max}} \quad (2b)$$

Dies ergibt mit den Werten aus dem FA-Beitrag $C_s = 18,8$ pF und daraus $L_{osz} = 1496$ μ H. Die durch die Serienschaltung resultierende Kreiskapazität läge zwischen 3,9 und 17,8 pF, was sich in der Praxis wegen der unvermeidlichen Schaltkapazitäten kaum realisieren ließe.

■ Dreipunktgleichlauf mit Parallel- und Serienkondensator

Dreipunktgleichlauf (nunmehr für f_u, f_m bzw. f_o) ist erst möglich, wenn Parallel- und Serienkondensator wie in Bild 3 zusammenwirken. Dann gilt:

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

Zur Ermittlung der zwei Unbekannten C_p und C_s ist noch ein zweiter Ausdruck erforderlich. (Anmerkung: Eine Gleichung mit zwei Unbekannten 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 aufweist, eingeführt. Natürlich können dann nicht mehr die Grenzkapazitäten C_{\max} und C_{\min} eingesetzt werden (die sind bereits vergeben in Gl. (3), sondern beide Frequenzintervalle müssen innerhalb der Gesamtkapazitätsänderung des Drehkondensators liegen.

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

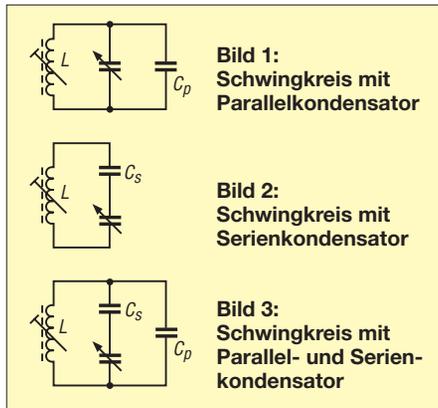


Bild 1: Schwingkreis mit Parallelkondensator

Bild 2: Schwingkreis mit Serienkondensator

Bild 3: Schwingkreis mit Parallel- und Serienkondensator

$$f_2 = \sqrt{f_1 \cdot f_3} \quad (4)$$

Die zugehörigen Drehkondensatorwerte seien dann C_1, C_2, C_3 . Es gilt dann für jeweils zwei Frequenzen und die zugehörigen Kapazitäten:

$$\frac{f_1^2}{f_2^2} = \frac{C_p + \frac{C_2 \cdot C_s}{C_2 + C_s}}{C_p + \frac{C_1 \cdot C_s}{C_1 + C_s}} \quad (5)$$

$$\frac{f_2^2}{f_3^2} = \frac{C_p + \frac{C_3 \cdot C_s}{C_3 + C_s}}{C_p + \frac{C_2 \cdot C_s}{C_2 + C_s}} \quad (6)$$

Aus diesen beiden Gleichungen (5) und (6) lassen sich C_p und C_s errechnen und man erhält nach einer zugegebenermaßen nicht ganz einfachen Umformung:

$$C_s = \frac{C_1 C_2 f_3^2 (f_1^2 - f_2^2) + \dots}{C f_1^2 (f_2^2 - f_3^2) + \dots} \quad (7)$$

$$\frac{+ C_2 C_3 f_1^2 (f_2^2 - f_3^2) - C_1 C_3 f_2^2 (f_1^2 - f_3^2)}{+ C_3 f_3^2 (f_1^2 - f_2^2) - C_2 f_2^2 (f_1^2 - f_3^2)}$$

Zur Vereinfachung der weiteren Rechnungen wollen wir nun folgende Ersetzungen einführen:

$$\begin{aligned} F1 &= f_1^2 - f_2^2 & K1 &= C_1 \cdot C_2 \\ F2 &= f_2^2 - f_3^2 & K2 &= C_2 \cdot C_3 \\ F3 &= f_1^2 - f_3^2 & K3 &= C_1 \cdot C_3 \end{aligned}$$

Diese Ausdrücke setze man nun in Gleichung (7) ein und gelangt zu (8):

$$C_s = \frac{K1 F1 f_{osz1}^2 + K2 F2 f_{osz1}^2 - K3 F3 f_{osz2}^2}{F2 C_{e1} f_{osz1}^2 + F1 C_{e3} f_{osz3}^2 - F3 C_{e2} f_{osz2}^2}$$

Nun lässt sich auch der Parallelkondensator C_p berechnen. Man erhält zwei Gleichungen (von denen eine zur Proberechnung herangezogen werden sollte):

$$C_p = \frac{C_s}{F1} \cdot \left(\frac{C_2 f_2^2}{C_2 + C_s} - \frac{C_1 f_1^2}{C_1 + C_s} \right) \quad (9)$$

$$C_p = \frac{C_s}{F2} \cdot \left(\frac{C_3 f_3^2}{C_3 + C_s} - \frac{C_2 f_2^2}{C_2 + C_s} \right) \quad (10)$$

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

$$L_{osz} = \frac{25 \cdot 330 \cdot 10^6}{f_2^2 \cdot \left(C_p + \left(\frac{C_2 \cdot C_s}{C_2 + C_s} \right) \right)} \quad (11)$$

mit f in kHz, C in pF und L in μ H; die Zahl $25 \cdot 330 \cdot 10^6$ ergibt sich aus $10^{12}/(4\pi^2)$. Diese so genannte zugeschnittene Größengleichungen erspart das Hantieren mit Potenzen bei den einzelnen Bauelementewerten – ein nicht zu unterschätzender Vorteil beim Rechnen mit dem Taschenrechner.

■ Die Berechnung

Zur Veranschaulichung des gesamten Rechengangs sei die Berechnung der Schwingkreise einer Superhet-Mischstufe für den MW-Bereich (525 kHz bis 1605 kHz) durchgeführt. Die Bereichs- und Kapazitätsgrenzen werden mit

$$f_u = 520 \text{ kHz}, C_{\max} = 500 \text{ pF}, f_o = 1615 \text{ kHz} \text{ und } C_{\min} = 20 \text{ pF}$$

festgelegt. Die Zwischenfrequenz sei $f_z = 467$ kHz. Drehkondensator und f_z weichen hier also von den Zahlenwerten im FA-Beitrag ab. Im u. g. Excel-Arbeitsblatt lassen sich diese Parameter ggf. variieren. Nach Gleichung (1) erhält man für das Quadrat der Frequenzvariation des Eingangskreises

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

sowie für die Kapazitätsvariation

$$V_c = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \frac{500 \text{ pF}}{20 \text{ pF}} = 25.$$

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

$$C_t = \frac{f_u^2 \cdot C_{\max} - f_o^2 \cdot C_{\min}}{f_o^2 - f_u^2}$$

$$C_t = \frac{520^2 \cdot 500 - 1610^2 \cdot 20}{1610^2 - 520^2} \text{ pF} = 35,52 \text{ pF}.$$

Die Kapazitätsvariation des Eingangskreises ergibt sich nun zu

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

also $V_f^2 = V_c$, was ja die Absicht war! Wegen der vorhandenen Schaltkapazitäten ist der tatsächliche Wert C_t allerdings kleiner. Die notwendige Induktivität L_{eing} des Eingangskreises erhalten wir nun aus der größten Kapazität (C_{\max}) und der niedrigsten Frequenz (f_u):

$$L_{\text{eing}} = \frac{25\,330 \cdot 10^6}{f_u^2 \cdot (C_{\max} + C_t)}$$

$$= \frac{25\,330 \cdot 10^6}{520^2 \cdot (500 + 35,90)} \mu\text{H} = 174,93 \mu\text{H}.$$

Nun wenden wir uns dem **Oszillatorkreis** zu und berechnen zunächst die Lage der Sollpunkte. Man wählt diese 10 % bis 20 % unter- bzw. oberhalb der Bandgrenzen. In unserem Beispiel ergibt sich (gewählt!)

$$f_{e1} = f_o - 10\% \cdot f_o = 1453,5 \text{ kHz},$$

$$f_{osz1} = f_{e1} + f_z = 1920,5 \text{ kHz};$$

$$f_{e3} = (f_u + 20\% \cdot f_u) = 624 \text{ kHz},$$

$$f_{osz3} = f_{e3} + f_z = 1091 \text{ kHz}.$$

Die Wahl der Sollfrequenzen sollte so erfolgen, dass sich möglichst keine „krummen“ Werte (Kommastellen) ergeben. Das bereits erwähnte Arbeitsblatt erleichtert die Auswahl, da man schnell durch Probieren zum Ziel gelangt.

Die mittlere Oszillatorfrequenz erhalten wir aus Gleichung (4) zu

$$f_{osz2} = \sqrt{1920,5 \cdot 1091} \text{ kHz} = 1447,5 \text{ kHz}.$$

Hieraus ergibt sich die zugehörige Eingangsfrequenz

$$f_{e2} = f_{osz2} - f_z = 980,5 \text{ kHz}.$$

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

$$C_{e1} = \frac{25\,330 \cdot 10^6}{f_{e1} \cdot L_{\text{eing}}} - C_t$$

$$= \frac{25\,330 \cdot 10^6}{1453,5^2 \cdot 174,93} \text{ pF} - 35,52 \text{ pF}$$

$$C_{e1} = 33,02 \text{ pF}, C_{e2} = 115,10 \text{ pF},$$

$$C_{e3} = 336,37 \text{ pF}.$$

Der Wert des Paralleltrimmers C_t wird abgerechnet, da nur die Stellung des Dreh-

kondensators für die weitere Rechnung von Interesse ist. Wegen der Gleichheit der zwei bzw. drei Plattenpakete des Drehkondensators sind nämlich die entsprechenden Kapazitätswerte C_{osz1} , C_{osz2} und C_{osz3} beim Oszillatorkreis **dieselben** wie C_{e1} , C_{e2} und C_{e3} beim Eingangskreis!

Nun zur Berechnung der Hilfsgrößen für den **Oszillatorkreis**:

$$K1 = C_{e1} \cdot C_{e2} = 33,02 \cdot 115,10 = 3800,99;$$

$$K2 = 115,10 \cdot 336,37 = 38\,716,74;$$

$$K3 = 33,02 \cdot 336,37 = 11\,107,86;$$

$$F1 = f_{osz1}^2 - f_{osz2}^2 = 1920,5^2 - 1447,5^2$$

$$= 1\,593\,054,75;$$

$$F2 = f_{osz2}^2 - f_{osz3}^2 = 1447,5^2 - 1091,0^2$$

$$= 904\,984,50;$$

$$F3 = f_{osz1}^2 - f_{osz3}^2 = 1920,5^2 - 1091,0^2$$

$$= 2\,498\,039,25$$

Beim Eintippen in den Taschenrechner sollte man da schon aufpassen ...

Nun können wir nach Gleichung (8) den Seriendensator C_s des Oszillatorkreises berechnen und aus diesem nach Gleichung (9) den Paralleltrimmer C_p .

$$C_s = \frac{3800,99 \cdot 1\,593\,054,75 \cdot 1091,00^2 + 38\,716,74 \cdot 904\,984,50 \cdot 1920,5^2 - 11\,107,86 \cdot 2\,498\,039,25 \cdot 1447,5^2}{904\,984,50 \cdot 33,02 \cdot 1920,5^2 + 1\,593\,054,75 \cdot 336,37 \cdot 1091,00^2 - 11\,107,86 \cdot 2\,498\,039,25 \cdot 1447,5^2} \text{ pF}$$

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

$$C_p = \frac{537,79}{1\,593\,054,75} \cdot \left(\frac{115,10 \cdot 1447,5^2}{115,10 \cdot 537,79} - \frac{33,02 \cdot 1920,5^2}{33,02 + 537,79} \right) \text{ pF}$$

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

Zur Probe wiederholen wir die Rechnung nach Gleichung (10) – sie sollte denselben Wert für C_p liefern.

Der tatsächliche Wert des Paralleltrimmers ist abzüglich der Schaltkapazitäten zu verstehen, also stets kleiner als berechnet!

Nun fehlt noch die Induktivität des **Oszillatorkreises**, die sich nach Gleichung (11) berechnen lässt. Dazu ist die mittlere Oszillatorfrequenz f_{osz2} zu verwenden!

Zusammenstellung der ermittelten Werte*

	Eingang	Oszillator
f/kHz		
f_u	520	987
f_3	624	1091
f_2	980,5	1447,5
f_1	1453,5	1920,5
f_o	1615	2082
L/μH		
L_{eing} bzw. L_{osz}	174,92	81,97
C/pF		
C_t bzw. C_p	35,52	52,67
C_s		537,79

* für Drehko 20...500 pF und $f_z = 467 \text{ kHz}$

$$L_{osz} = \frac{25\,330 \cdot 10^6 \mu\text{H}}{1447,5^2 \cdot \left(52,67 + \frac{115,10 \cdot 537,79}{115,10 + 537,79} \right)}$$

$$L_{osz} = 81,97 \mu\text{H}.$$

Obige Tabelle fasst alle Werte zusammen. Auf der FA-Website steht ein *Excel*-Arbeitsblatt zum Herunterladen bereit, das sich auch mit dem Programm *Scalc* aus dem freien *Open Office*-Paket (<http://de.openoffice.org>) öffnen lässt. Unter dessen Verwendung kann man auf diese Weise die interessierenden, frequenzbestimmenden Werte des Superhetempfängers festlegen. Selbst wenn kein PC zur Verfügung steht, ist eine Lösung mittels Taschenrechners recht einfach möglich, wenn man sich an das gezeigte Schema hält.

■ **Nachwort**

Die hier wiedergegebene Verfahrensweise 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 Rechenschieber und Logarithmentafel (wer kann so was noch?) durchgeführt ...

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

wf-home@arcor.de