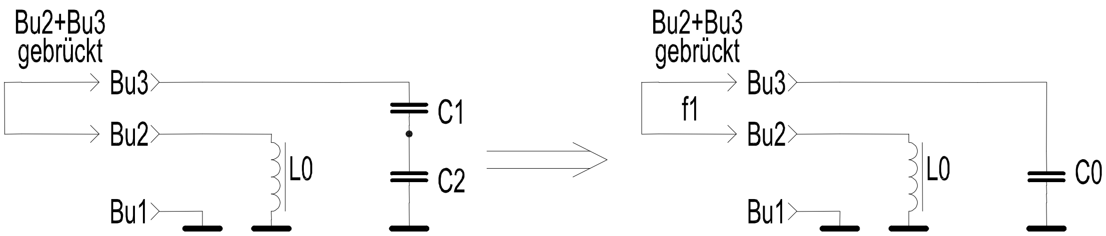
Gerät zum Messen der Kapazität und Induktivität

Beim Selbstbau von Amateurfunkgeräten werden gelegentlich eng tolerierte Kondensatoren und/oder Induktivitäten benötigt. Als Beispiel sei ein Tiefpass im Ausgang eines Senders genannt, wo es darauf ankommt, ein Nutzsignal gerade noch durchzulassen aber unerwünschte Nebenaussendungen zu unterdrücken. Es besteht die Möglichkeit, einstellbare und feste Kapazitäten oder Induktivitäten in Kombination zu verwenden, um einen gewünschten Kapazitäts- bzw. Induktivitätswert zu erhalten. Dem steht entgegen, dass Trimmer oder Spulen mit beweglichen Teilen nicht stabil und/oder verlustbehaftet sind und einen größeren Bauraum als Festwert-Bauelemente benötigen.

Zum Herstellen von Induktivitäten verwenden Amateure gern Ringkerne, deren Windungszahl anhand des AL-Wertes berechnet wird. Hierzu hat DL5SWB das Programm „mini Ringkern-Rechner“ geschrieben und bietet es zum Herunterladen auf seiner Website an. Wegen der Toleranzen des AL-Wertes des Kernmaterials und der Toleranzen der Kern- und Wickelgeometrie wird die Induktivität einer nach Rechnung bewickelten Spule stark schwanken. Die Induktivität wird mit Hilfe eines genauen Messgeräts eingestellt, indem die Windungszahl und/oder die Lage der Windungen auf dem Ringkern verändert werden.

Ein geeignetes Messgerät hat K6OLG beschrieben: Bill Carver, "The LC Tester", Communications Quarterly, Winter 1993, S. 19-27. Das Gerät ist ein Musterbeispiel dafür, wie Amateure mit geringstem Aufwand größten Nutzen erzielen.

Das LC-Messgerät enthält eine Oszillatorschaltung mit einem Transistor als Verstärkerelement und einem frequenzbestimmenden LC-Parallelkreis. Der JFET ist so beschalten, dass ein Teil der Ausgangsspannung gleichphasig auf den Verstärkereingang zurückgeführt wird, sodass bei genügender Verstärkung und Mitkopplung eine Selbsterregung eintritt. K6OLG verwendete in einer Hartley-Schaltung eine Spule mit Anzapfung. Ich bevorzugte für das LC-Messgerät eine Colpitts-Schaltung, wie sie W7ZOI vorgeschlagen hat (W. Hayward, R. Campbell, B. Larkin; "Experimantal Methods in RF Design"; S. 7.12). Die Spule L_0 in dem frequenzbestimmenden Parallelkreis der Colpitts-Schaltung weist wickeltechnisch vorteilhaft keine Anzapfung auf, während die Schwingkreiskapazität C_0 aus einer Reihenschaltung zweier Kapazitäten C_1, C_2 besteht.



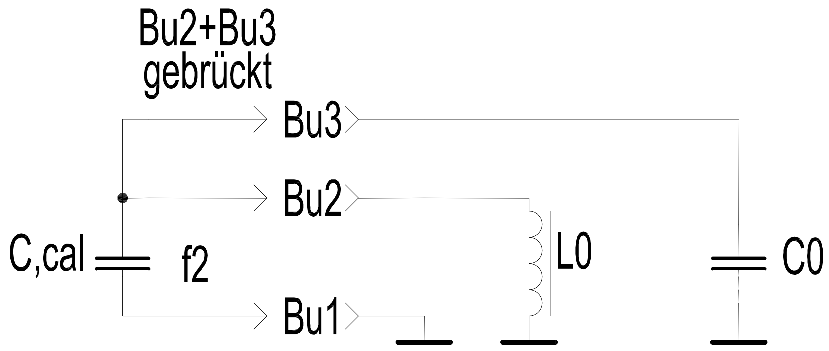
Damit ergibt sich C_0 zu: $C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$.

1. Kalibrieren

Zum Kalibrieren werden die effektiv wirksamen L_0 und C_0 bestimmt. Für einen Parallelkreis aus L_0 und C_0 ergibt sich eine Resonanzfrequenz ω_1:

$$\omega_1{}^2 = \frac{1}{C_0 L_0} \qquad (1)$$

Wenn der Kapazität C_0 eine hochgenau ausgemessene Kalibrierkapazität C_{cal} parallel geschalten wird, dann ergibt sich eine Resonanzfrequenz $\omega_2 < \omega_1$:



$$\omega_2{}^2 = \frac{1}{(C_0+C_{cal})L_0} \qquad (2)$$

(1) nach L_0 umgestellt ergibt:

$$L_0 = \frac{1}{\omega_1{}^2 C_0} \qquad (3)$$

(3) in (2) eingesetzt führt zu:

$$\omega_2{}^2 = \frac{1}{(C_0+C_{cal})\frac{1}{\omega_1{}^2 C_0}} = \frac{\omega_1{}^2 C_0}{(C_0+C_{cal})}$$

Multiplizieren mit $(C_0 + C_{cal})$:

$\omega_2{}^2(C_0 + C_{cal}) = \omega_1{}^2 C_0$ und nach Ausmultiplizieren der Klammer:

$\omega_2{}^2 C_0 + \omega_2{}^2 C_{cal} = \omega_1{}^2 C_0$ bzw.:

$\omega_2{}^2 C_0 - \omega_1{}^2 C_0 = -\omega_2{}^2 C_{cal}$ bzw.:

$C_0(\omega_2{}^2 - \omega_1{}^2) = -\omega_2{}^2 C_{cal}$ bzw.:

$$C_0 = -\frac{\omega_2{}^2 C_{cal}}{\omega_2{}^2 - \omega_1{}^2} = C_{cal} * \frac{\omega_2{}^2}{\omega_1{}^2 - \omega_2{}^2} \qquad (4)$$

Weil die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ ist, gilt:

$$C_0 = C_{cal} * \frac{\omega_2{}^2}{\omega_1{}^2 - \omega_2{}^2} = C_{cal} * \frac{4\pi^2 f_2{}^2}{4\pi^2 f_1{}^2 - 4\pi^2 f_2{}^2} = C_{cal} * \frac{4\pi^2 f_2{}^2}{4\pi^2(f_1{}^2 - f_2{}^2)} = C_{cal} * \frac{f_2{}^2}{f_1{}^2 - f_2{}^2} \qquad (5)$$

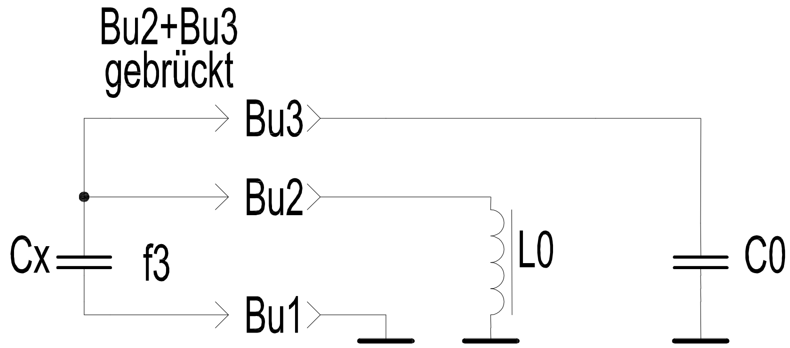
(4) eingesetzt in (3):

$$L_0 = \frac{1}{\omega_1{}^2 C_0} = \frac{1}{\omega_1{}^2\, C_{cal} * \frac{\omega_2{}^2}{\omega_1{}^2 - \omega_2{}^2}} = \frac{1}{C_{cal}} * \frac{\omega_1{}^2 - \omega_2{}^2}{\omega_1{}^2 \omega_2{}^2} = \frac{1}{C_{cal}} * \frac{f_1{}^2 - f_2{}^2}{4\pi^2 f_1{}^2 f_2{}^2} \qquad (6)$$

Wenn Bu2 und Bu3 gebrückt sind, stellt sich die Frequenz f_1 ein, die mit einem genauen Frequenzmesser an der dem Oszillator folgenden Pufferstufe bestimmbar ist. Wenn Bu2 und Bu3 gebrückt sind und der Kondensator C_{cal} zwischen Bu1 und Bu2/Bu3 geschalten ist, stellt sich die Frequenz f_2 ein. Damit kann aus (5) und (6) C_0 und L_0 allein aus den bekannten C_{cal}, f_1 und f_2 berechnet werden. Ein geschlossenes Gehäuse für den Oszillator wirkt als kalter Thermostat, so dass es ausreichend scheint, f_1, f_2 bzw. C_0, L_0, einmalig für unmittelbar nachfolgende LC-Messungen zu bestimmen. Je genauer C_{cal}, f_1 und f_2 bestimmt wurden, desto genauer ist eine LC-Messung.

2. Bestimmen einer unbekannten Kapazität

Eine unbekannte Kapazität C_x wird wie die Kalibierkapazität C_{cal} angeschalten:



Der Parallelkreis ist resonant bei $\omega_3 = 2\pi f_3$ mit $\omega_3 < \omega_1$, wobei die wirksame Kapazität (C_0 + C_x) ist.

$$\omega_1{}^2 = \frac{1}{C_0 L_0} \tag{1}$$

$$\omega_3{}^2 = \frac{1}{(C_0+C_x)L_0} \tag{7}$$

Aus (7) folgt:

$\omega_3{}^2 * (C_0 + C_x)L_0 = 1$ bzw.:

$C_0 + C_x = \frac{1}{\omega_3{}^2 L_0}$ bzw.:

$$C_x = \frac{1}{\omega_3{}^2 L_0} - C_0 \tag{8}$$

Aus (1) folgt wieder:

$$L_0 = \frac{1}{\omega_1{}^2 C_0} \tag{3}$$

(3) eingesetzt in (8) ergibt sich C_x aus:

$$C_x = \frac{1}{\omega_3{}^2 L_0} - C_0 = \frac{1}{\omega_3{}^2 * \frac{1}{\omega_1{}^2 C_0}} - C_0 = \frac{\omega_1{}^2 C_0}{\omega_3{}^2} - C_0 = C_0\left(\frac{\omega_1{}^2}{\omega_3{}^2} - 1\right) = C_0 * \frac{\omega_1{}^2 - \omega_3{}^2}{\omega_3{}^2} = C_0 * \frac{f_1{}^2 - f_3{}^2}{f_3{}^2} \tag{9}$$

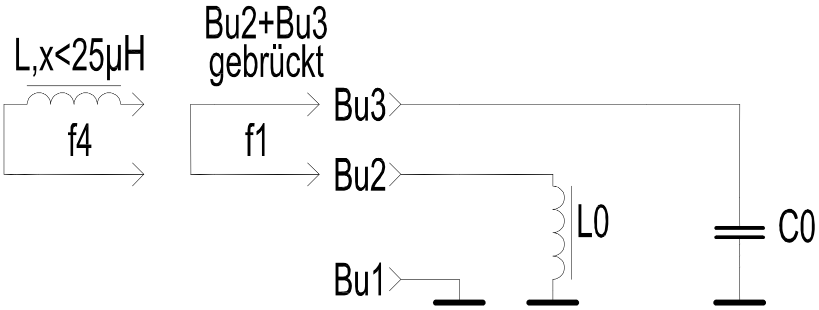
Wenn (9) nach f_3 umgestellt wird, erhält man:

$$f_3 = f_1 * \sqrt{\frac{C_0}{C_0+C_x}} \tag{10}$$

f_3 ist die Frequenz, die sich beim Anschalten eines Kondensators mit der Kapazität C_x an Bu1 und Bu2/Bu3 ergibt. Wenn ein Kondensator mit einem krummen Wert benötigt wird, werden Kondensatoren hinzugeschalten oder weggenommen, bis sich die Frequenz f_3 einstellt.

3. Bestimmen einer unbekannten Induktivität L_x < 25 μH

Eine unbekannte kleine Induktivität L_x wird an Stelle der Brücke zum Messen von f_4 zwischen Bu2 und Bu3 geschalten:



Der Parallelkreis ist resonant bei $\omega_4 = 2\pi f_4$ mit $\omega_4 < \omega_1$, wobei die wirksame Induktivität bei einer Reihenschaltung der Induktivitäten (L_0 + L_x) ist.

$$\omega_1{}^2 = \frac{1}{C_0 L_0} \qquad (1)$$

$$\omega_4{}^2 = \frac{1}{C_0 (L_0 + L_x)} \qquad (11)$$

(11) umformen:

$\omega_4{}^2 * C_0(L_0 + L_x) = 1$ bzw.:

$L_0 + L_x = \frac{1}{\omega_4{}^2 C_0}$ bzw.:

$$L_x = \frac{1}{\omega_4{}^2 C_0} - L_0 \qquad (12)$$

Aus (1) folgt:

$$C_0 = \frac{1}{\omega_1{}^2 L_0} \qquad (3)$$

(3) eingesetzt in (12) ergibt sich L_x aus:

$$L_x = \frac{1}{\omega_4{}^2 C_0} - L_0 = \frac{1}{\omega_4{}^2 * \frac{1}{\omega_1{}^2 L_0}} - L_0 = \frac{\omega_1{}^2 L_0}{\omega_4{}^2} - L_0 = L_0 \left(\frac{\omega_1{}^2}{\omega_4{}^2} - 1\right) = L_0 * \frac{\omega_1{}^2 - \omega_4{}^2}{\omega_4{}^2} = L_0 * \frac{f_1{}^2 - f_4{}^2}{f_4{}^2} \qquad (13)$$

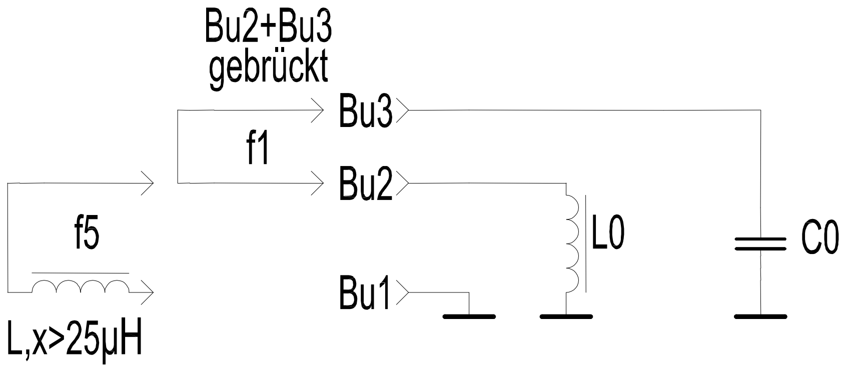
Wenn (13) nach f_4 umgestellt wird, erhält man:

$$f_4 = f_1 * \sqrt{\frac{L_0}{L_0 + L_x}} \qquad (14)$$

Mit (14) ist es möglich, eine Ringkernspule auf eine gewünschte Induktivität L_x zu trimmen. Während die Ringkernspule an Bu2 und Bu3 angeschaltet ist, werden die Abstände der Wicklungen auf dem Kern gleichmäßig vergrößert oder verringert, bis der Frequenzzähler f_4 anzeigt. Wenn das nicht gelingt, müssen eine oder mehrere Windungen entfernt werden. Bei sehr kleinen Induktivitäten spielt die Induktivität der Brücke zwischen Bu2 und Bu3 eine Rolle. L_x sollte dann um die Brückeninduktivität (z.B. 0,001 μH) vermindert werden.

4. Bestimmen einer unbekannten Induktivität L_x > 25 μH

Eine unbekannte große Induktivität L_x wird zum Messen von f_5 zwischen Bu1 und Bu2 geschalten, während Bu2 und Bu3 gebrückt bleiben:



Der Parallelkreis ist resonant bei $\omega_5 = 2\pi f_5$ mit $\omega_5 > \omega_1$, wobei sich die wirksame Induktivität bei einer Parallelschaltung von L_0 und L_x aus

$\frac{L_x L_0}{L_x + L_0}$ ergibt.

$$\omega_1{}^2 = \frac{1}{C_0 L_0} \qquad (1)$$

$$\omega_5{}^2 = \frac{1}{C_0 * \frac{L_x L_0}{L_x + L_0}} = \frac{L_x + L_0}{C_0 L_x L_0} \qquad (15)$$

(15) umgeformt:

$\omega_5{}^2 C_0 L_x L_0 = L_x + L_0$ bzw.:

$\omega_5{}^2 C_0 L_x L_0 - L_x = L_0$ bzw.:

$L_x(\omega_5{}^2 C_0 L_0 - 1) = L_0$ bzw.:

$$L_x = \frac{L_0}{\omega_5{}^2 C_0 L_0 - 1} \qquad (16)$$

Aus (1) folgt wieder: $C_0 = \frac{1}{\omega_1{}^2 L_0}$ (3)

(3) eingesetzt in (16):

$$L_x = \frac{L_0}{\omega_5{}^2 C_0 L_0 - 1} = \frac{L_0}{\omega_5{}^2 * \frac{1}{\omega_1{}^2 L_0} * L_0 - 1} = \frac{L_0}{\frac{\omega_5{}^2}{\omega_1{}^2} - 1} = L_0 * \frac{1}{\frac{\omega_5{}^2 - \omega_1{}^2}{\omega_1{}^2}} = L_0 * \frac{\omega_1{}^2}{\omega_5{}^2 - \omega_1{}^2} = L_0 * \frac{f_1{}^2}{f_5{}^2 - f_1{}^2} \qquad (17).$$

Die Frequenz f_5, welche sich beim Parallelschalten einer Spule mit einer gewünschten Induktivität L_x einstellen soll, errechnet sich durch Umstellen aus (17):

$$f_5 = f_1 * \sqrt{\frac{L_0 + L_x}{L_x}} \qquad (18)$$

Mit (18) ist es möglich, eine Ringkernspule auf eine gewünschte Induktivität L_x zu trimmen (siehe oben unter Punkt 3).