

Messung des Q -Faktors eines RLC-Kreises – verschiedene Spulenformen

Kann man die Güte (den Q -Faktor) eines elektromagnetischen Schwingkreises aus Spule und Kondensator (RLC -Schwingkreis) durch eine besondere Art oder Bauweise der Spule steigern? Die Frage ist heutzutage nicht mehr von Bedeutung, spielte aber in den Anfangsjahren der Radiotechnik eine gewisse Rolle. Damals waren die Abstimmeelemente in den Eingangsstufen von Empfängern in der Regel RLC -Kreise, so dass deren Q -Wert die Trennschärfe bestimmte.

Spulen wurden beispielsweise aus HF -Litze gewickelt, um die ohmschen Verluste im Kupferdraht gering zu halten: Hochfrequente Ströme fließen wegen des Skin-Effekts vorzugsweise in der Nähe der Drahtoberfläche. Deshalb vergrößert man diese, indem man mehrere dünne Drähte zu Litze bündelt. Der Strom verteilt sich dadurch über eine größere Querschnittsfläche, so dass sich der elektrische Widerstand verringert und der Q -Wert steigt. Ein Problem war auch die (wenn auch kleine) Kapazität der Spule, die sich bei parallel geführten Windungen nicht vermeiden lässt. Sie wird verringert, indem man die Wicklungen bewusst zickzag-förmig anlegt – ein Verfahren, das in der sogenannten Kreuzwickelspule angewandt wird.

Da die Spule offensichtlich das Bauelement mit dem größten Einfluss auf den Q -Wert eines RLC -Kreises ist, vergleichen wir Schwingkreise mit drei unterschiedlichen Spulen. Die Spulen sind eine HF -Drossel (1), eine Ringkern-Spule (2) und eine HF -Kreuzwickelspule (3). Sie haben in etwa die

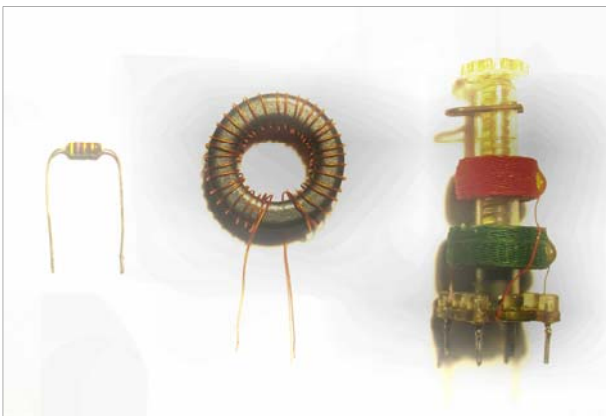


Abbildung 1 Die untersuchten Spulen (v.l.n.r.): (1) HF -Drossel, (2) Ringkern-Spule (mit Cu-Draht) und (3) HF -Kreuzwickelspule (obere, rote Spule)

gleiche Induktivität ($L \approx 400 \dots 600 \mu\text{H}$), sind aber unterschiedlich aufgebaut (Abbildung 1). Der Kondensator des Kreises hat in allen drei Fällen die Kapazität $C = 10 \text{ nF}$, so dass die Resonanzfrequenz von der Größenordnung 70 kHz ist. Wir schalten Spule und Kondensator einmal in Serie (Serienkreis), das andere Mal parallel (Parallelkreis) und bestimmen den Q -Wert für beide Kreise.

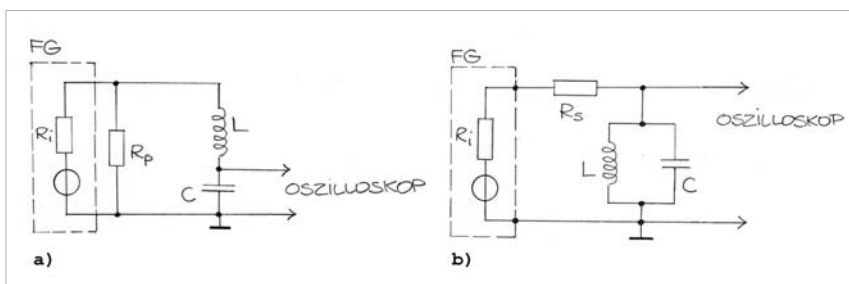


Abbildung 2 Stromlaufplan a) Serienkreis, b) Parallelkreis. FG = Funktionsgenerator als Rauschquelle. Widerstände $R_p = 1 \Omega$, $R_s = 1 \text{ M}\Omega$, siehe Text.

Der Q -Wert wird aus der Bandbreite B der Resonanzkurve abgelesen. Ist f_r die Frequenz des Maximums (Resonanzfrequenz) und B die (-3 dB)-Bandbreite der Kurve, gilt

$$(1) \quad Q = \frac{f_r}{B}$$

Zur Darstellung der Resonanzkurve benutzen wir die Filtermethode. Das heißt, wir legen an den Kreis ein Rauschsignal mit gleichförmiger spektraler Verteilung (weißes Rauschen) und beobachten, welche Frequenzen der Schwingkreis aus dem Rauschsignal herausfiltert. Abbildung 2 zeigt die Messanordnung. Der Funktionsgenerator (FG) ist die Rauschspannungs- bzw. Rauschstromquelle. Die Widerstände R_p (parallel zu den Klemmen des FG , Abbildung 2a) und R_s (in Serie mit dem Schwingkreis, Abbildung 2b) dienen dazu, die Dämpfung des Kreises durch den Innenwiderstand R_i des Funktionsgenerators ($R_i \approx 50 \Omega$) zu minimieren. Im Fall des Serienkreises wird $R_p = 1 \Omega$ als ausreichend erachtet – der Widerstand der Parallelschaltung mit R_i ist dann auf jeden Fall kleiner als 1Ω . Im Fall des Parallelkreises wählen wir $R_s = 1 \text{ M}\Omega$, dieser Wert sollte genügend groß sein gegenüber den 10 bis 100 $\text{k}\Omega$, die man erfahrungsgemäß als effektiven Dämpfungswiderstand des Kreises bei Resonanz misst.

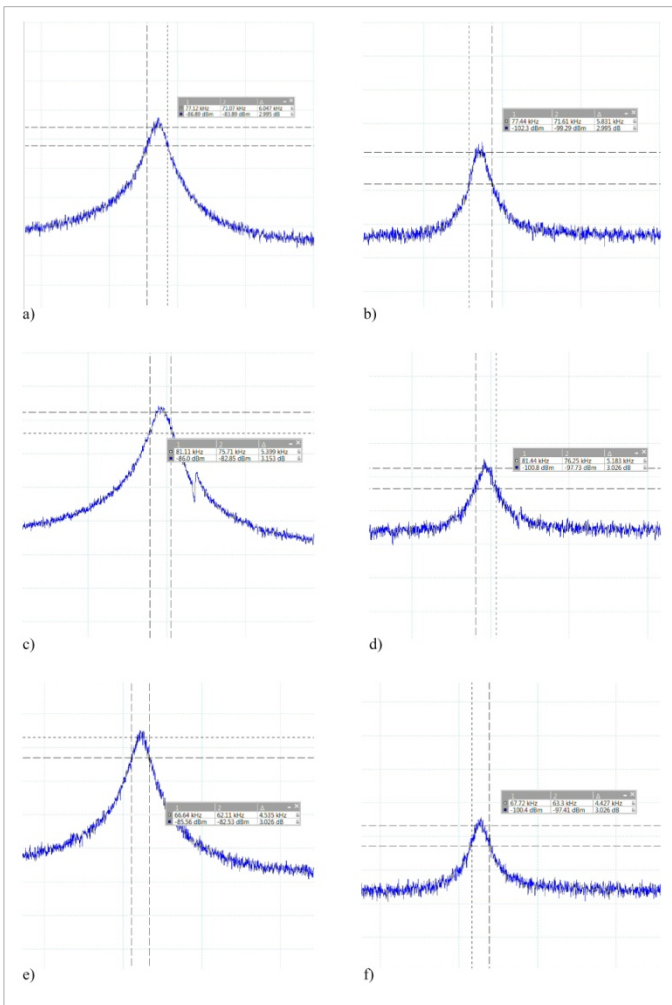


Abbildung 3 Resonanzkurven der RLC-Schwingkreise: a) Serienkreis mit HF-Drossel, b) Parallelkreis mit HF-Drossel, c) Serienkreis mit Ringkernspule, d) Parallelkreis mit Ringkernspule, e) Serienkreis mit HF-Kreuzwickelspule f) Parallelkreis mit HF-Kreuzwickelspule

Die am Kondensator bzw. Kreis abgegriffene Spannung wird dem Analog-Digital-Wandler eines USB-Oszilloskops zugeführt, nach Fourier analysiert und spektral zerlegt auf dem Bildschirm eines PC dargestellt. In Abbildung 3 sind die Resonanzkurven (die Spektren in der Umgebung der Resonanzfrequenz) der untersuchten Kreise zusammengefasst. Aus den Spektren werden f_r und B abgelesen, daraus ergibt sich Q nach Gleichung (1). Die so ermittelten Messwerte sind in Tabelle 1

Tabelle 1 Messwerte des Q-Faktors, ermittelt aus den Resonanzkurven der Abbildung 3. Aus den Kurven werden f_r und B abgelesen, daraus ergibt sich Q nach Gleichung (1).

Spule	L/ μ H	C/nF	Serienkreis			Parallelkreis		
			f_r /kHz	B/kHz	Q	f_r /kHz	B/kHz	Q
HF-Drossel	423	10	74,10	6,047	12,3	74,53	5,831	12,8
Ringkern-Spule	450	10	78,41	5,399	14,5	78,85	5,183	15,2
HF-Kreuzwickelspanne	571	10	64,38	4,535	14,2	65,51	4,427	14,8

aufgeführt. Überraschenderweise sind die Q-Faktoren mehr oder weniger gleich groß – nur der Wert für die HF-Drossel weicht etwas nach unten ab. Gibt es eine Erklärung dafür?

Aus den Q-Werten lässt sich der effektive (Ersatz-)Widerstand R berechnen, der die ohmschen Verluste des Kreises berücksichtigt. Er ist beim Serienkreis in Reihe mit L und C und beim Parallelkreis parallel zu L und C zu denken. Die Theorie ergibt

$$(2) \quad Q = \omega_0 \frac{L}{R} \quad (\text{Serienkreis})$$

und

$$(3) \quad Q = \omega_0 RC \quad (\text{Parallelkreis}).$$

Dabei ist

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Die nach diesen Gleichungen berechneten (Ersatz-)Widerstände R sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2 Effektiver (Ersatz-)Widerstand R des RLC-Kreises, berechnet nach Gleichungen (2) und (3) aus L , C und den gemessenen Q-Werten.

Spule	L/ μ H	C/nF	ω_0/s^{-1}	R	
				Serienkreis	Parallelkreis
HF-Drossel	423	10	$468 \cdot 10^3$	16,1 Ω	2,63 k Ω
Ringkern-Spule	450	10	$471 \cdot 10^3$	14,6 Ω	3,23 k Ω
HF-Kreuzwickelspanne	571	10	$418 \cdot 10^3$	16,3 Ω	3,54 k Ω

Sie sind, was ihre Größenordnung betrifft, plausibel. Es zeigt sich im Übrigen, dass die Widerstände $R_p = 1 \Omega$ (parallel zu den Klemmen des Rauschgenerators im Fall des Serienkreises) und $R_s = 1 \text{ M}\Omega$ (in Serie zum Parallelschwingkreis) ausreichend klein bzw. groß sind, um die Kreise nicht durch den Innenwiderstand des Rauschgenerators ($R_i \approx 50 \Omega$) zu dämpfen, siehe die Bemerkungen zu Abbildung 2 oben.