2.14 Der Quarz in der Schaltung

2.14.1 Das Blindwiderstandsdiagramm

Für das Ersatzschaltbild erhalten wir den in Bild 2.56 dargestellten Blindwiderstandsverlauf. Wir finden zwei Frequenzen, für die unter Vernachlässigung der Verluste der Blindwiderstand null wird: Die vom Serienkreis L_1C_1 gebildete Serienresonanzfrequenz f_s und etwas oberhalb dieser Frequenz die Parallelresonanzfrequenz f_p, gebildet durch die Parallelschaltung der statischen Kapazität C_0 (Parallelkapazität) und der bei dieser Frequenz induktiven Komponente des Serienkreises, Bild 2.56

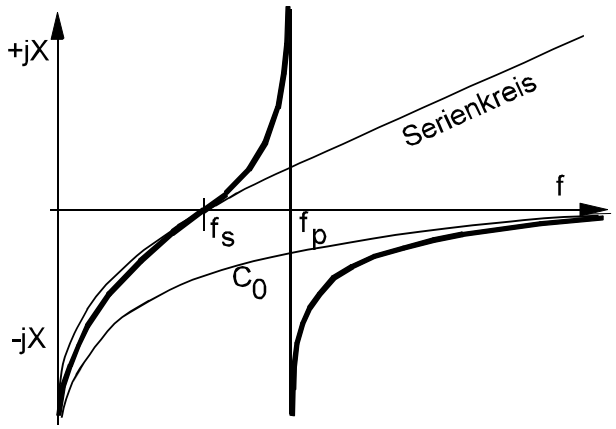

Bild 2.56 Blindwiderstandsdiagramm

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \tag{36}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}}} \tag{37}$$

Der relative Frequenzabstand zwischen den beiden Frequenzen ist:

$$\frac{f_p - f_s}{f_s} = \frac{1}{2r} \qquad mit \quad r = \frac{C_0}{C_1} \tag{38}$$

2.14.2 **Die Ortskurve des Scheinwiderstandes**

Obwohl die Darstellung des Ortskreises des Scheinleitwertes für Rechnungen in der Schaltung angenehmer ist, sollen hier die Begriffe der Schwingquarztechnik an der Ortskurve des Scheinwiderstandes erklärt werden, die begrifflich mit den Widerständen

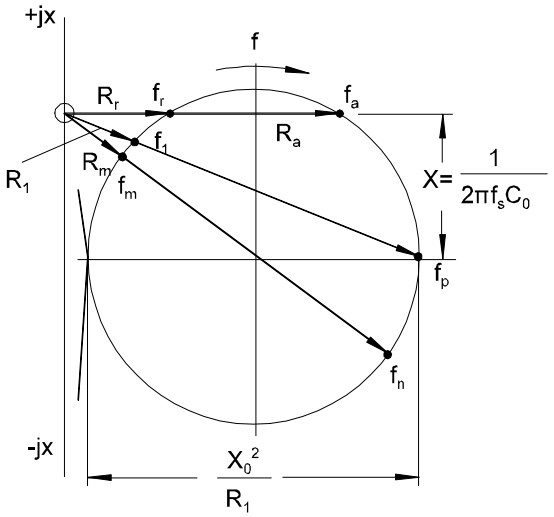

Bild 2.57 Ortskurve des Quarzscheinwiderstandes

des Quarzes im Zusammenhang stehen. Die Ortskurve, die Real- und Imaginärteil des Quarzscheinwiderstandes in Abhängigkeit von der Frequenz darstellt, verdeutlicht, daß durch die Wirkung der Parallelkapazität der Schwingquarz nicht genau bei der Serienresonanzfrequenz f_s reell ist.

Die Frequenz in der Nähe der Serienresonanz, bei der der Schwingquarz reell ist, wird **Resonanzfrequenz f_r** genannt, der hierzu gehörige Wirkwiderstand ist der **Resonanzwiderstand R_r**. Die Frequenz, bei der die Impedanz des Quarzes den minimalen Wert erreicht, ist die **Minimalimpedanzfrequenz f_m**. Die **Serienresonanzfrequenz f_s** liegt dazwischen.

Die Verlängerung ihres Vektors führt zur **Parallelresonanz f_p** am Größtwert von X_0^2/R_1. Bei der Parallelresonanz ist der Quarz weder reell, noch erreicht der Widerstand den Höchstwert. Für Oszillatoren gibt es keine Anwendung mit dieser Frequenz. Der Begriff der Parallelresonanz wird häufig mit dem Begriff der Lastresonanzfrequenz f_L verwechselt. Die Stelle auf dem Ortskreis mit der maximalen Impedanz ist die **Maximalimpedanzfrequenz fn**. Schließlich am hochohmigen Schnittpunkt des Ortskreises mit der reellen Achse die **Antiresonanzfrequenz f_a** mit dem zugehörigen **Parallelwiderstand R_a**. Der Abstand der Frequenzen f_r, f_s und f_m untereinander wird größer mit zunehmender Entfernung des Ortskreismittelpunktes von der reellen Achse durch die Wirkung von $1/\omega C_0$. Der zu f_r gehörende Resonanzwiderstand R_r wird hierbei größer. Bei ungünstigen Werten von X_0^2 berührt der Ortskreis bei keiner Frequenz

die reelle Achse, die Parallelkapazität C_0 muß kompensiert werden, üblicherweise durch Parallelschalten einer Induktivität $L_{Komp.}$ (Bild 2.58). Dies ist auch bei Messungen zu beachten.

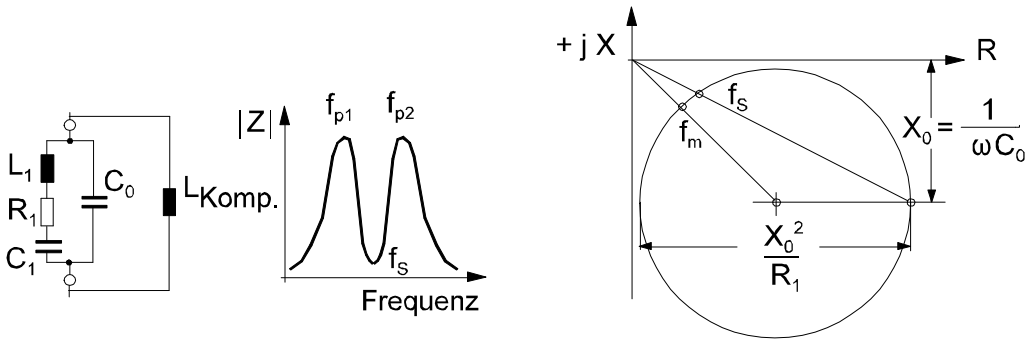

Abb. 2.58 C_0 - Kompensation

2.14.3 Der Schwingquarz mit Lastkapazität

Der Rückkopplungszweig der meisten Oszillatorschaltungen kann auf eine der PI-Schaltungen nach Bild 2.59 zurückgeführt werden. Der Schwingquarz wird oberhalb seiner Serienresonanz betrieben, er ist hier induktiv und bildet mit den beiden Kapazitäten C_A und C_B eine Resonanz, mit deren Frequenz der Oszillator schwingt. Zum gleichen Ergebnis führt die Schaltung nach Bild 2.59 C. In beiden Fällen erhalten wir eine neue Resonanzfrequenz, die sinnvoll Lastresonanzfrequenz f_L genannt wird. Aus dem Blindwiderstandsdiagramm Bild2.59 A erkennen wir weiterhin, daß der Quarz nur zwischen der Serienresonanz und der Parallelresonanz induktiv ist und deshalb mit kapazitiver Belastung nur zwischen diesen beiden Frequenzen betrieben werden kann. Er wird also nie auf seiner Parallelresonanz betrieben.

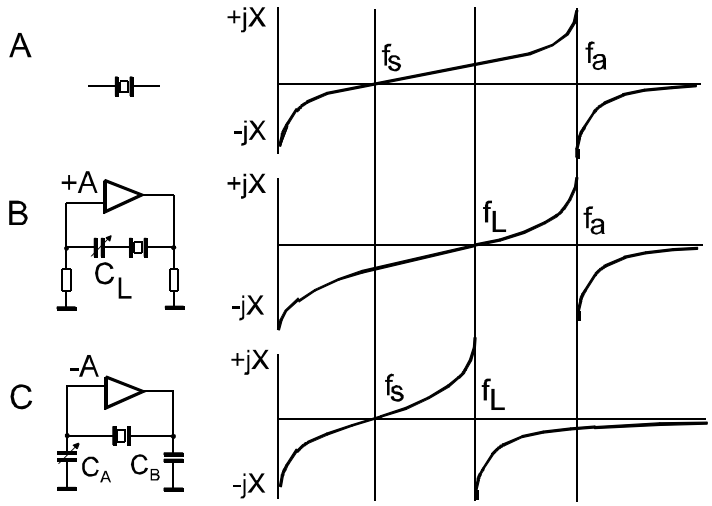

Bild 2.59 Blindwiderstandsdiagramm mit Lastkapazität

Die Frequenz mit der der Oszillator schwingt, wird nur durch die wirksame Lastkapazität C_L bestimmt. Diese ist bei der Bestellung von Quarzen anzugeben. Besondere Quarze für "Parallelresonanz" gibt es nicht. *Anmerkung: 1/CL ~ 1/CA + 1/CB*.
Die Lastresonanzfrequenz f_L liegt bei kapazitiver Last also immer über der Serienresonanzfrequenz f_s .

$$f_L = f_s + f_s \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \tag{39}$$

Die relative Differenz zwischen der Lastresonanzfrequenz f_L und der Serienresonanzfrequenz f_s ($\approx f_r$) ist der "Lastresonanzfrequenzoffset" LO: ($= D_L$ nach DIN-IEC 122)
Die durch Verändern der Lastkapazität erreichbare Frequenzänderung ist äußerst gering, aber ausreichend, um fertigungsbedingte Frequenztoleranzen (Quarz und Schaltung) auszugleichen. Hierzu wird der Kondensator C_A oder der dem Quarz in Serie liegende Lastkondensator C_L als Trimmkondensator ausgebildet. Die durch die Änderung der Lastkapazität erzeugte Frequenzänderung wird Ziehbetrag, Ziehbereich D oder im englischen Sprachraum auch Pulling Range PR genannt. Er beträgt:

$$D_{L1,L2} = PR = LO_1 - LO_2 = C_1 \frac{C_{L2} - C_{L1}}{2(C_0 + C_{L1})(C_0 + C_{L2})} \tag{41}$$

Die relative Frequenzänderung $\Delta f_L/f_r$ für eine angegebene Änderung der Lastkapazität wird auch Ziehbarkeit des Schwingquarzes genannt (Pullability). Die wirksame Kapazität der Schaltung bei Mittelstellung des Ziehtrimmers muß der nominellen

$$D_L = LO = \frac{f_L - f_s}{f_s} = \frac{\Delta f_L}{f_s} = \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \tag{40}$$

Lastkapazität des Schwingquarzes entsprechen. Der Schwingquarzhersteller justiert die Lastresonanzfrequenz der Schwingquarze mit diesem angegebenen Nominalwert der Lastkapazität.

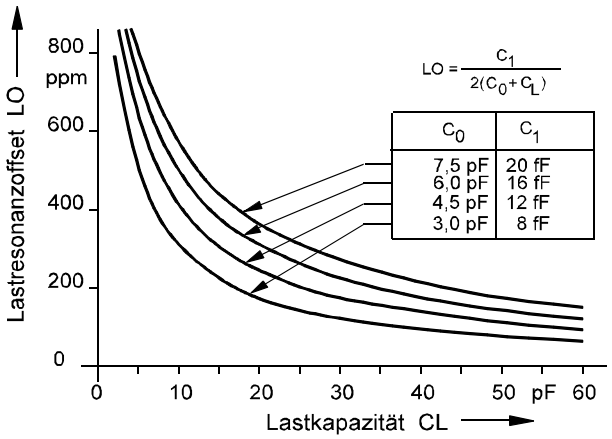

Bild 2.60 Lastresonanzoffset LO
bei Quarzen unterschiedlicher Ersatzdaten

Der Differentialquotient der Lastresonanzfrequenz zur Lastkapazität $\delta f_L/\delta C_L$ wird die relative Ziehempfindlichkeit S genannt.

$$S = \frac{\delta f_L}{\delta C_L} = - \frac{C_1}{2(C_0 - C_L)^2} \qquad (42)$$

Dieser Ausdruck der Ziehempfindlichkeit ist hauptsächlich für Stabilitätsbetrachtungen brauchbar. Wir können aus den Bildern 2.60 und 2.61 entnehmen, daß eine größere Ziehbarkeit nicht nur mit Quarzen größerer dynamischer Kapazität erreicht wird, sondern die Wahl einer kleineren Lastkapazität wirkungsvoller sein kann.

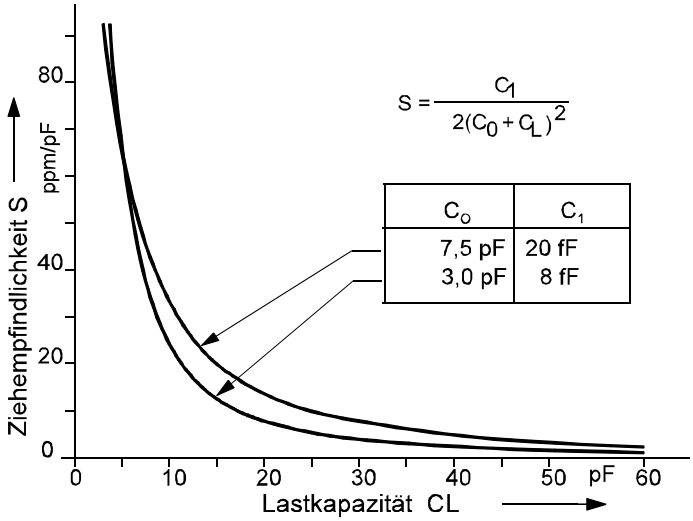

Bild 2.61 Ziehempfindlichkeit S
bei Quarzen unterschiedlicher Ersatzdaten

Die nominelle Lastkapazität wird durch sämtliche, dem Schwingquarz parallel und in Serie liegende Kapazitäten gebildet. Weil die Streukapazitäten, Halbleiterkapazitäten und etwaige Phasendrehungen im Oszillatorverstärker schwer erfaßbar sind, ermittelt

man die wirksame Lastkapazität der Schaltung, indem mit einem Quarz bekannter Ersatzdaten die Arbeitsfrequenz f_W gemessen und aus der Ablage Δf_L gegenüber der Serienresonanzfrequenz entsprechend Gl.(40) die Lastkapazität C_L errechnet wird, siehe auch Beispiel 2.20.3. Liegt bei dieser Messung die Arbeitsfrequenz des Quarzoszillators tiefer als die Serienresonanz des Schwingquarzes, so ist die Schaltung induktiv (negative Lastkapazität). Meist wird die induktive Komponente durch unzulässige Phasendrehungen im Oszillator hervorgerufen. Diese Schaltung bzw. die Halbleiter mit ungenügend hoher Grenzfrequenz sind zu verwerfen. Aber auch unnötige Streukapazitäten sind zu vermeiden, weil sie die Ziehbarkeit einschränken und die Stabilität des Oszillators beeinträchtigen.

Bei Betrieb der Schwingquarze mit einer Lastkapazität kommen die transformierten Ersatzdaten des Schwingquarzes zur Wirkung. Bei Reihenschaltung des Schwingquarzes mit einer Lastkapazität C_L erhält man den Lastresonanzwiderstand R_L (früher eff. Serienwiderstand R'r)

$$R_L = R_r\left(1+\frac{C_0}{C_L}\right)^2 \qquad (43)$$

Parallel zum Quarz liegende Kapazitäten C_s vergrößern den Lastresonanzwiderstand R_L erheblich. Große Kapazitäten, wie Parallel angeordnete Ziehtrimmer können sogar den Lastresonanzwiderstand soweit vergrößern, daß die Schwingungen abreißen, weil die Rückkopplungsbedingung nicht mehr erfüllt ist. Ziehtrimmer sollen deshalb grundsätzlich nicht parallel zum Quarz geschaltet werden, sondern wie im Prinzip in Bild 2.62 angedeutet.

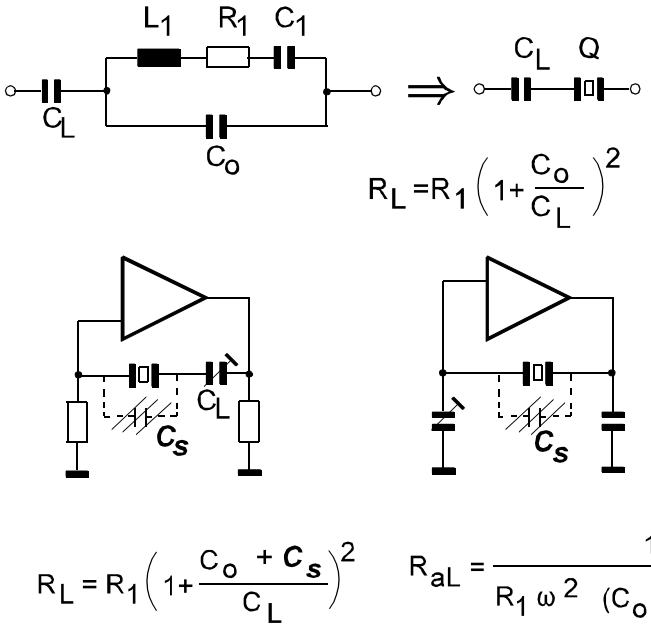

Bild 2.62 Transformation der Ersatzdaten