

Kurzes Schwingquarz- und Oszillator-Tutorial

Inhaltsverzeichnis

1	Schwingquarze	2
1.1	Ersatzschaltbild des Schwingquarzes.....	2
1.2	Wichtige Parameter der Quarzherstellung und Entwicklungsparameter.....	3
1.3	Schwingquarz in 'Serienresonanz'	3
1.3.1	Einfluss der Parallelkapazität	5
1.3.2	Serienwiderstand, dynamische Kapazität, Güte.....	6
1.4	Schwingquarze mit Lastkapazität abgeglichen	8
1.5	Nebenresonanzen von Schwingquarzen	12
2	Quarzoszillatoren	14
2.1	Pierce-Oszillator mit invertierendem Verstärker	14

1 Schwingquarze

Dieses Handbuch bietet eine kurze Zusammenfassung der Quarzgrundlagen, der gebräuchlichen Terminologie und der wichtigsten Parameter für Schaltungen, die auf Quarzen basieren.

Die Design-Grundlagen werden mit der GEYER Y-Design App verifiziert, die den Entwurf und die Optimierung einer Oszillatorschaltung ermöglicht und Ihnen bei der Auswahl des geeigneten Quarzes hilft.

Die Y-Design App steht zum kostenlosen Download im Google oder Apple Playstore oder als Windows-Version unter <https://www.geyer-electronic.de/design-testcenter/design-unterstuetzung/> zur Verfügung.

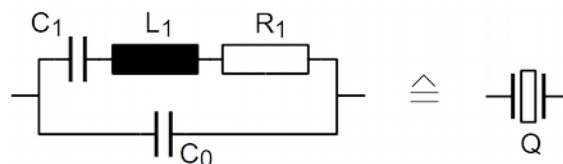
Basierend auf einer modernen und benutzerfreundlichen Menüführung, bietet die App:

- eine grafische und numerische Darstellung der Eingangs-/Ausgangsparameter
- einfache Eingabe oder Upload von bestehenden Schaltungen
- die Auswahl der gewünschten Bauteilgrößen
- den Import von designspezifischen Vorlagen
- eine direkte Musterabfrage und einen Link zum GEYER-Online-Shop

1.1 Ersatzschaltbild des Schwingquarzes

Ein Oszillator ist ein elektrischer Schwingkreis, der einen piezoelektrischen Kristall als frequenzbestimmendes Element verwendet.

Die mechanische Schwingung, die durch ein elektrisches Wechselfeld geeigneter Frequenz piezoelektrisch angeregt wird, entspricht dem Ersatzschaltbild in Bild 1, das aus einem Serienschwingkreis und einer Parallelkapazität besteht. Die üblichen Parameter sind die dynamische Kapazität C_1 , die dynamische Induktivität L_1 , der Serienwiderstand R_1 , die diesen sogenannten dynamischen Zweig bilden, sowie die Parallelkapazität C_0 (statisch).



*Bild 1
Ersatzschaltbild eines
Schwingquarzes*

Die Kapazität C_1 entspricht der Elastizitätskonstanten des Quarzes, die Induktivität L_1 der schwingenden Resonatormasse. Im Widerstand R_1 fasst man die Verluste durch innere Reibung im Kristall, in der Halterung und auch die Dämpfung durch die umgebende Atmosphäre zusammen. Schließlich führen die Elektroden-flächen auf der Quarzoberfläche zu einer Kapazität C_0 .

Aus diesem Ersatzschaltbild lässt sich die niederohmige Serienresonanz f_s des dynamischen Zweiges mit C_1 und L_1 berechnen, sowie die hochohmige Parallelresonanz f_p des Parallelschwingkreises aus C_0 und in diesem Fall dem induktiven Zweig aus C_1 und L_1 .

Die Serienresonanzfrequenz f_s des Quarzes ist durch die Serienresonanz des dynamischen Zweigs definiert

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

Die Parallelresonanzfrequenz f_p ist definiert durch

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}} L_1} = f_s \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0}}$$
$$\approx f_s \left(1 + \frac{C_1}{2C_0}\right) \quad \text{für } C_0 \gg C_1$$

Bei beiden Frequenzen ist die Impedanz des Kristalls nicht rein ohmsch, sondern hat auch einen kapazitiven Anteil.

1.2 Wichtige Parameter der Quarzherstellung und Entwicklungsparameter

Die Leistung eines Quarzes ist eine Kombination aus der Resonanzfrequenz und dem Resonanzmodus, dem Serienwiderstand, der Lastkapazität, dem Ansteuerungspegel und - sehr wichtig - der Frequenzstabilität im gewünschten Temperaturbereich. All diese Parameter sind im Datenblatt des Herstellers des jeweiligen Quarzes aufgeführt.

Aus dem in Bild 1 dargestellten Quarz-Ersatzschaltbild geht hervor, dass die dynamische Kapazität C_1 , die Induktivität L_1 , der Serienwiderstand R_1 , sowie die Shunt-Kapazität C_0 Parameter sind, die während des Fertigungsprozesses festgelegt werden.

In den nächsten Kapiteln werden wir die einzelnen Quarzeigenschaften beschreiben und die Auswirkungen auf die jeweiligen Designs zeigen, wobei wir die GEYER Y-Design App zur Darstellung der Schaltungen verwenden.

Die Design App hat 3 Hauptbestandteile: **Quarz** = Eingangsparameter (die Spezifikationen des Quarzes), **Schaltung** = die berechneten Ausgangsparameter und die **grafische Darstellung** der Verstärkung und der Phase.

1.3 Schwingquarz in 'Serienresonanz'

Der Unterschied zwischen dem Serien- und dem Parallelmodus besteht darin, dass die Resonanzfrequenz eines Parallelschwingquarzes etwas höher ist als die eines Serienschwingers. Es ist jedoch wichtig, zwei verschiedene Resonanzformen zu haben, da sie für die Gestaltung des Oszillatorkreises optimiert sind.

„Serienresonanz-Quarz“ bedeutet, dass der Resonator bei der Herstellung ohne zusätzliche Lastkapazität auf die gewünschte Frequenz ausgerichtet wird.

Für Serienresonanz-Schwingquarze aktivieren Sie die Option 'Serienresonanz'. Die Nennfrequenz ergibt sich dann, wenn der Schieberegler für C_L auf Maximum steht (C_L kurzgeschlossen).

Wir simulieren einen Quarz, wie im Ersatzschaltbild beschrieben, mit den Parametern C_1 , L_1 , R_1 (dem so genannten "dynamischen Zweig") und der "statischen" Shunt-kapazität C_0 ohne jegliche Lastkapazität.

Hinweis: Quarze mit Serienresonanz sind nicht der Normalfall, Quarze werden viel häufiger mit Lastkapazität verwendet.

Während in Bild 2 die Impedanzansicht dieser Resonanzform zu sehen ist, zeigt Bild 3 die Admittanzform.

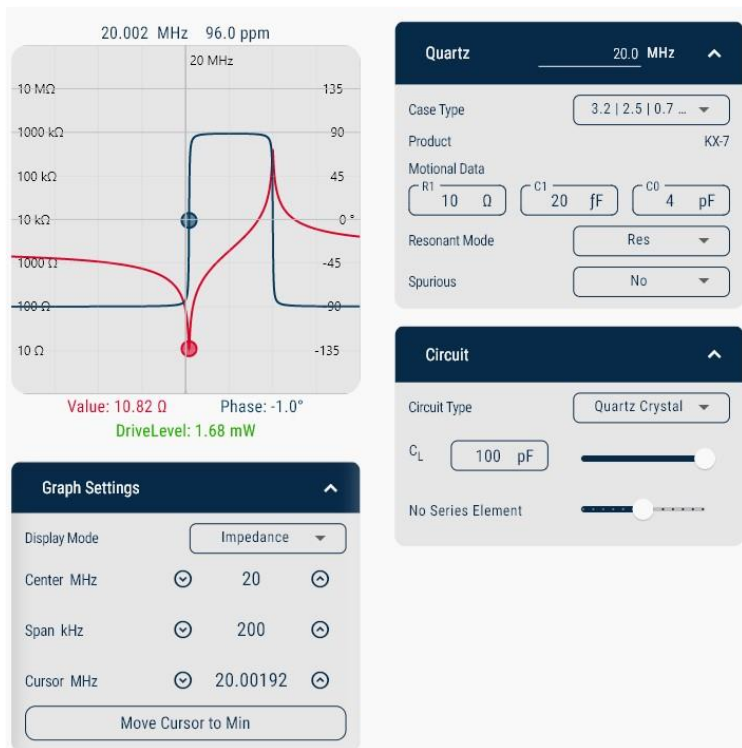


Bild 2
Quarz in Serienresonanz, kein C_L ;
Impedanzansicht

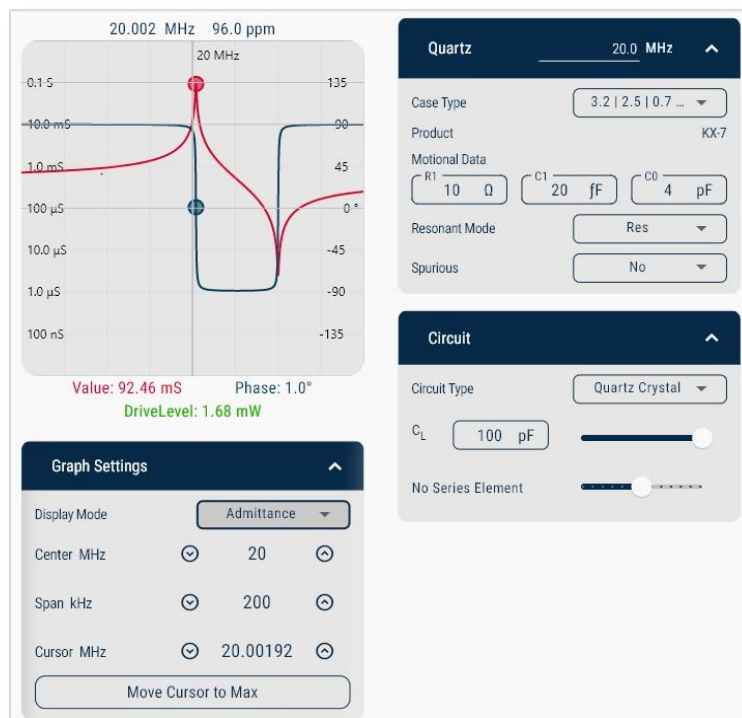


Bild 3
Quarz in Serienresonanz, kein C_L ;
Admittanzansicht

1.3.1 Einfluss der Parallelkapazität

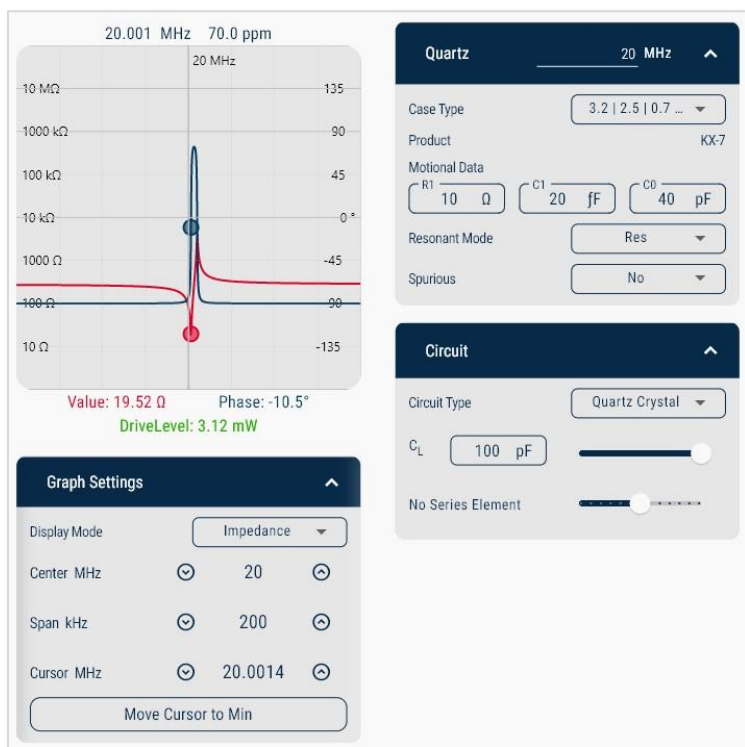
Die Shunt-Kapazität C_0 ist eine statische Kapazität zwischen den Quarzanschlüssen, gemessen in pF und ist vorhanden, unabhängig davon, ob der Quarz schwingt oder nicht.

C_0 hängt vom Dielektrikum des Quarzes, der Fläche der Quarzelektroden und der Kapazität des Quarzhalters ab.

Die Auswirkungen eines sehr hohen C_0 auf die Serienschwingung sind in Bild 4 dargestellt.

Bei sehr hohen Frequenzen, wie in Bild 5, wird die Wirkung der Shunt-Kapazität durch einen induktiven C_0 kompensiert, sowohl bei der Herstellung während des Abgleichs als auch in der Anwendungsschaltung.

Für die folgende Analyse des Resonatorgütefaktors setzen wir die äquivalenten Parameter des Resonators auf die Werte $R_1 = 10 \Omega$, $C_1 = 2 \text{ fF}$, $C_0 = 4 \text{ pF}$.



*Bild 4
Serienresonanz-Schwingquarz mit extrem
großem (unrealistischem) C_0*



Bild 5
Serienresonanz-Schwingquarz
mit hoher Frequenz

1.3.2 Serienwiderstand, dynamische Kapazität, Güte

Die beiden Hauptvorteile von Quarzkristallen sind die sehr gute Frequenzstabilität über die Temperatur und die hohe Schwingungsgüte, d.h. die Schärfe der Resonanz.

Der Gütefaktor Q kann mit einer Formel ausgedrückt werden, die den dynamischen Widerstand R_1 und die dynamische Kapazität C_1 im Verhältnis zur Induktivität L_1 enthält:

$$Q = \frac{1}{2\pi f C_1 R_1} = \frac{2\pi f L_1}{R_1}$$

Ein höheres C_1 sowie ein höheres R_1 bedeuten eine Verringerung des Gütefaktors. Außerdem führt ein höheres C_1 zu einem größeren Abstand zwischen Serien- und Parallelresonanz.

Bild 6 zeigt die Zusammenfassung der Diagramme für $R_1 = 10 \Omega$ und $R_1 = 40 \Omega$ überlagert. Die Resonanzspitzen sind abgeflacht, wenn R_1 größer ist. Der Gütefaktor ist geringer.

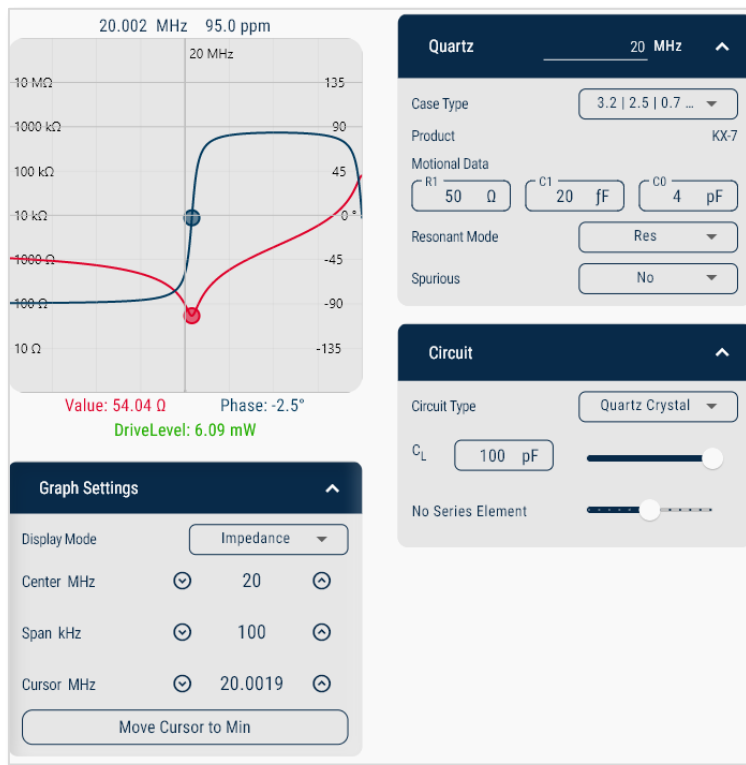


Bild 6
Einfluss von R_1

Bei größerer dynamischen Kapazität C_1 würde die Güte ebenfalls kleiner, aber um mit dem C_1 -Wert realitätsnah zu bleiben, zeigt das folgende Bild 7 diesmal die Auswirkung eines vierfach kleineren C_1 von 5 pF: die Resonanzen werden schärfer, die Güte wird größer.

Es ist jedoch auch zu erkennen, dass der Abstand Serien- zu Parallelresonanz entsprechend der Verringerung von C_1 um den Faktor 4 reduziert ist.



Bild 7
Einfluss von C_1

1.4 Schwingquarze mit Lastkapazität abgeglichen

Wie bereits erwähnt, ist die übliche Anforderung ein Quarz mit Lastkapazität. Der Grund dafür ist einfach: Oszillatorschaltungen bieten im Allgemeinen eine kapazitive Lastkomponente für den Resonator an diesen Anschlusspunkten. Dies ist in der Regel auf Kondensatoren zurückzuführen, die als Teil der Rückkopplung eines Oszillatorschaltkreises für die Schwingung sorgen.

Um auf der richtigen Frequenz zu schwingen, muss der Quarz seine richtige Lastkapazität "sehen".

Die Ziehempfindlichkeit steht in direktem Zusammenhang mit dem Verhalten des Oszillators und gibt an, wie empfindlich die Frequenz auf Änderungen der äußeren Parameter reagiert.

Je kleiner die gewünschten Temperatortoleranzen sind, desto mehr spielt die Ziehfähigkeit eine Rolle.

$$TS = C_1 \times 10^6 / 2x(C_0 + C_L)^2 \text{ (ppm/pF)}$$

Die Lastkapazität C_L ist anders als angenommen, nicht eine Quarzeigenschaft, sondern ein Parameter, der bei der Schaltungsentwicklung bestimmt wird.

Die Lastkapazität wird aus der Reihenschaltung von den bestückten Kondensatoren C_a und C_b , den Streukapazitäten C_{stray} der Leiterplatte und des Oszillatorverstärkers wie folgt ermittelt:

$$C_L = (C_a \times C_b) / C_a + C_b + C_{\text{stray}} + C_{\text{chip}}$$

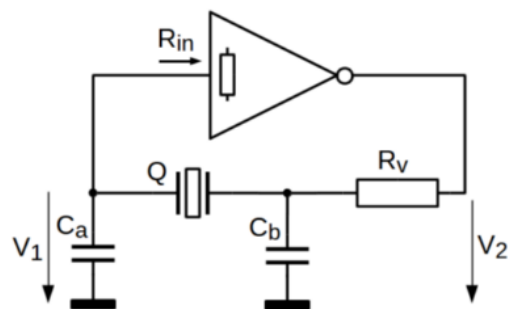


Bild 8
Pierce Oszillator

C_a = Kondensator am Eingang des Oszillatorverstärkers

C_b = Kondensator am Ausgang des Oszillatorverstärkers

C_{stray} = Streukapazität (Erfahrungswert 5 pF, Bereich 3 pF ~ 10 pF)

Bei der Bestimmung der Lastkapazität kommt es auf eine Erwägung der wichtigsten Anforderungen an.

Ein niedriger C_L ermöglicht zwar eine geringere Leistungsaufnahme, bzw. eine kürzere Anschwingzeit, ist dafür aber anfälliger gegenüber Toleranzen.

	C_L groß	C_L klein
Leistungsaufnahme der Oszillatorschaltung	höher	geringer
Anschwingzeit des Oszillators	länger	kürzer
Empfindlichkeit gegenüber Bauteiltoleranzen	gering	hoch

Oft empfehlen auch die IC Hersteller bestimmte C_L Werte, die auf Erfahrungswerten beruhen.

Zur Überprüfung bzw. Dimensionierung der Kondensatoren C_a und C_b , kann man bei einem bekannten C_L den klassischen oder den alternativen Ansatz wählen:

Klassischer Ansatz

(beide Kondensatoren gleich groß):

$$C_a = C_b = 2 \times C_L - C_s$$

Alternativer Ansatz

(Kondensatoren unterschiedlich):

$$C_a = 1,1 \sim 1,2 \times C_L - C_s$$

$$C_b = 4 \times C_L - C_s$$

Der alternative Ansatz bringt häufig Vorteile: größere Anschwingreserve, schnelleres Anschwingen, geringere Quarzbelastung. Es gibt jedoch vereinzelt ICs, bei denen der alternative Ansatz nicht funktioniert; das muss im Einzelfall ausprobiert werden.

Auf jeden Fall muss das Quarzoszillatordesign auf einem Prototypen noch verifiziert werden.

Abgleich-Tipp: Frequenz zu hoch – C_b vergrößern. Frequenz zu niedrig – C_a verkleinern

Erst gegen Ende des Fertigungsprozesses der Quarze wird im Rahmen der Frequenzjustierung das Thema C_L berücksichtigt.

Für jedes Gehäuse gibt es empfohlene Lastkapazitäten, sowie alternativ mögliche Werte, die im Datenblatt angegeben sind. Üblicher Bereich ist 6 – 20 pF.

Reduziert man den C_L bei einer kleinen Bauform um die Ziehfähigkeit zu erhalten, wirken sich jedoch andere Faktoren wie Streukapazität und Toleranzen stärker auf die Frequenzgenauigkeit aus.

Daher ist eine Verifizierung der Prototypschaltung grundsätzlich notwendig

Die im Herstellungsprozess bzw. im Abgleichverfahren des Herstellers verwendete Lastkapazität C_L muss dann in der Anwenderschaltung mit dieser Kapazität übereinstimmen und ist daher ein wichtiger Spezifikationsparameter zusammen mit der Lastresonanzfrequenz f_L , die in Bild 9 als niederohmige Resonanz der Schaltung definiert ist.

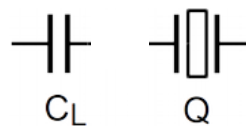


Bild 9
Schwingquarz mit
Serien-(Last)-Kapazität

Der Zusammenhang zwischen f_s und f_L ist

$$f_L \approx f_s \left(1 + \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \right)$$



Bild 10
Schwingquarz mit
Serien-(Last)-Kapazität

Wie in Bild 10 dargestellt, ist der Abstand zur Parallelresonanz im Vergleich zum Serienresonanz-Quarz (Bild 2) geringer. Der Grund dafür ist einfach: der Lastschwingquarz ist bereits mit der Kapazität C_L von 15 pF in diese Richtung gezogen worden. Eine kurzgeschlossene Reihenkapazität C_L unter 'Schaltung' ergibt also wieder den alten Abstand aus Bild 2 (Bild 11).



Bild 11
Schwingquarz mit Lastkapazität
Lage von Lastresonanz-frequenz von f_L
und Serienresonanz-frequenz f_s

Der Anwender kann beim Quarz mit Lastkapazität durch Variation der Schaltungskapazität eine Frequenzkorrektur in beide Richtungen veranlassen (Ziehen des Quarzes). Beim Serienresonanz-Quarz ist dagegen kapazitiv nur eine Erhöhung der Frequenz möglich.

Durch Erhöhen der wirksamen Lastkapazität in der Schaltung lässt sich die Lastresonanzfrequenz f_L bis herunter zur eigentlichen Serienresonanzfrequenz f_s verringern, umgekehrt lässt sie sich durch Verkleinern der wirksamen Serienkapazität bis nahe an die Parallelresonanzfrequenz f_p vergrößern. Die Möglichkeit der Veränderung nach beiden Seiten erlaubt nicht nur den Ausgleich von Fertigungstoleranzen, sondern auch die gezielte Frequenzänderung bei spannungsgesteuerten Oszillatoren. Eine sehr kleine Serien- (Last-) Kapazität reduziert jedoch die Stabilität drastisch und erhöht den Lastresonanzwiderstand sehr stark.

Dieser neue Gesamt-Resonanzwiderstand der Serienschaltung ist der Lastresonanzwiderstand R_L

$$R_L \approx R_1 \left(1 + \frac{C_0}{C_L}\right)^2$$

R_L wird auch als "transformierter R_1 " bezeichnet und ist größer als der tatsächliche Resonanzwiderstand R_r des Quarzes ohne Lastkapazität. Ohne die Schaltkreiskapazität (Schaltkreis C_L auf groß eingestellt) kommen wir auf den nicht transformierten Resonanzwiderstand von 10Ω zurück.

Die relative Differenz zwischen Resonanzfrequenz und Lastresonanzfrequenz heißt Lastresonanzfrequenz-Offset D_L

$$D_L \approx \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)}$$

Die differentielle Ziehempfindlichkeit S ist

$$S = \frac{1}{f_s} \frac{\delta f_L}{\delta C_L} = -\frac{C_1}{2(C_0 + C_L)^2}$$

Zusammengefasst:

Da bei einem Serienschwingquarz eine Veränderung mit externer Abgleichkapazität nur in eine Richtung (nach oben) möglich ist, während Fertigungsungenauigkeiten meist in beide Richtungen gehen, ergibt sich die Notwendigkeit, die Nennfrequenz zusammen mit einer Lastkapazität für den Fertigungsprozess vorzugeben. Die Serienresonanzfrequenz ist dann, wie zu Beginn des Kapitels gezeigt, etwas niedriger und ein Fertigungstoleranzbereich sowie die begrenzte Genauigkeit der Schaltungswerte können durch die Schaltungsabstimmung vollständig kompensiert werden.

Ebenso ist zu beachten, dass eine Frequenzveränderung nach unten auch mit einer Lastinduktivität erreicht werden kann. Diese Möglichkeit sollte nur dann genutzt werden, wenn große Abstimbereiche erforderlich sind: Induktivitäten haben in der Regel nicht die Einstellbarkeit, die Genauigkeit und die Temperaturstabilität von Kondensatoren.

Außerdem ist klar, dass bei spannungsgesteuerten Oszillatoren mit großen Ziehbereichen ein eher großer C_1 -Wert wünschenswert ist. Andererseits sollten für hochpräzise, hochwertige Oszillatoren mit hoher Frequenzstabilität Resonatoren mit kleinem C_1 -Wert verwendet werden.

1.5 Nebenresonanzen von Schwingquarzen

Spurious resonances

Mit dieser Option kann ein zusätzlicher Zweig mit den dynamischen Parametern C_{1n} , L_{1n} und R_{1n} parallel zum Quarzkristall mit C_1 , L_1 und R_1 hinzugefügt werden: eine sogenannte Nebenresonanz des Kristalls.

Bei Temperaturänderungen können sich diese "Nebenresonanzen" aufgrund ihres viel größeren Temperaturkoeffizienten über die Hauptresonanz hinweg bewegen. Es stehen drei Nebenresonanzwiderstände zur Auswahl. Die Nebenresonanz C_1 ist in den jeweiligen Simulationen immer $C_1/10$.

In Bild 12 ist die Option " $R_{1n} = 10 \times R$ " gewählt; bei entsprechender Einstellung des Schiebereglers "Temperatur" ergibt sich eine kleine Spitze unterhalb der Hauptresonanz f_r .

Übrigens liegt die Parallelresonanzfrequenz jetzt etwa 10 % höher: in der Simulation wird angenommen, dass das C_{1n} der Nebenresonanz bei 10% des C_1 der Hauptresonanz liegt und somit zur Abstandsserien-/Parallelresonanz beiträgt (aber nur, wenn die Haupt- und die störende Serienresonanz fast auf der gleichen Frequenz liegen!).

Diese unerwünschten Resonanzen zeigen in der Regel eine große Temperaturabhängigkeit im Vergleich zur gewünschten Resonanz. Sie können die "Temperatur" in der Simulation und damit die Frequenz der Störsignale durch Verschieben des Schiebereglers verändern.

Wenn ein Quarz mit Lastkapazität verwendet wird, kann der Einfluss von Störresonanzen erheblich zunehmen (Bild 13).

Je nach Wert der Störparameter kann sich der Resonanzwiderstand deutlich erhöhen, die richtige Resonanz kann sich verschieben oder es können sogar zwei gleich starke Resonanzpunkte entstehen.



Bild 12
Serienresonanz-Schwingquarz
mit Nebenresonanz

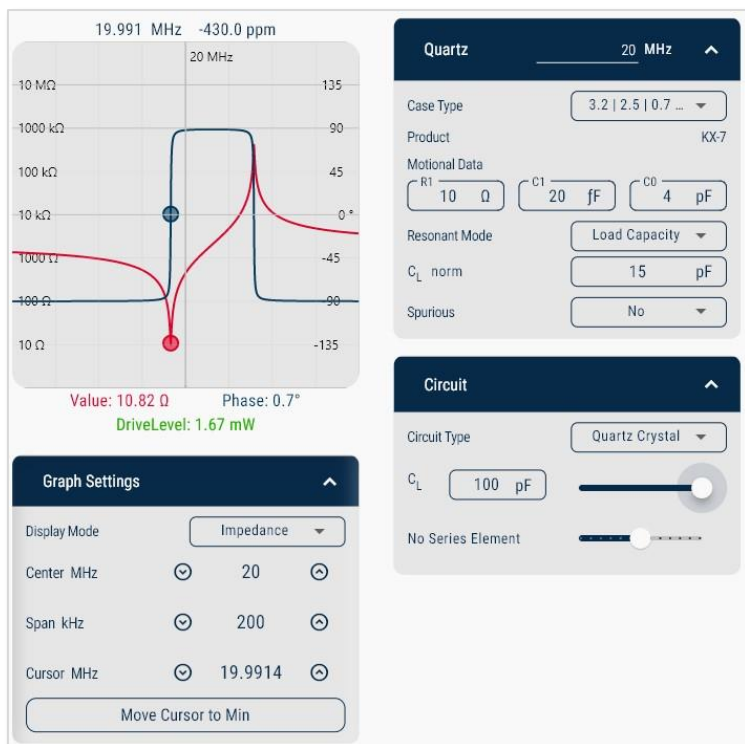
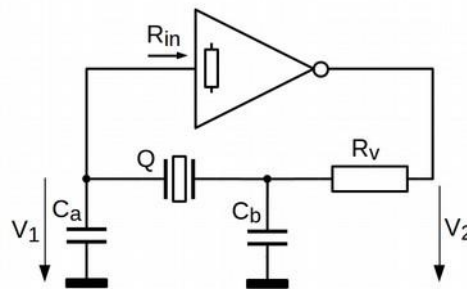


Bild 13
Quartz crystal with load capacitance
stronger influence of a spurious
resonance

2 Quarzoszillatoren

2.1 Pierce-Oszillator mit invertierendem Verstärker

In den meisten Mikroprozessoren wird ein Quarzoszillator in Pierce-Konfiguration als Taktgeber verwendet. Der aktive Teil wird von einem Inverter übernommen. Im Menü "Struktur" kann das Rückkopplungsnetzwerk eines solchen Pierce-Oszillators ausgewählt und simuliert werden.



*Bild 14
Pierce-Oszillator mit Inverter
und Rückkopplungs-Netzwerk für
Grundtonquarze
(Elemente der Betriebsspannung oder zur
Stabilisierung des Arbeitspunkts sind nicht gezeigt)*

Der Ausgangswiderstand des Inverters zusammen mit dem Widerstand R_v und dem PI-Glied C_b / Quarz / C_a bilden einen schmalen Bandpass mit frequenzabhängiger Phasenverschiebung. Gemäß Schwingbedingung muss die Gesamtphase 360° sein. Der Inverter sorgt für 180° , meist für etwas mehr wegen zusätzlicher, halbleiterbedingter Laufzeitverzögerungen. Die externe Phasenverschiebung durch den Bandpass kann daher geringfügig kleiner als 180° sein.

Die App simuliert das Übertragungsverhalten des PI-Netzwerks, das aus R_v , C_b , Q , C_a besteht, nach Verstärkung (Amplifikation), Phase bei f_L (Zentrum) und Umgebung (Spannweite).

Das Ziel ist eine:

- Verstärkung (Gain) bei f_L so hoch wie möglich.
- Phase bei f_L so nahe wie möglich bei -180°

Automatische Optimierung: Suche die Werte für R_v , C_b , C_a , entweder manuell oder über die Optimierungstaste, für die das Ziel (siehe oben) maximiert wird.

Wählen Sie die Werte der externen Komponenten so, dass sowohl die Amplituden- als auch die Phasenkomponente der Resonanzbedingung erfüllt werden, ohne die maximale Quarzlast zu überschreiten; in der Regel kann ein guter Kompromiss gefunden werden. Die Wahl desselben Wertes für C_a und C_b , z. B. der doppelte Wert von C_L , kann funktionieren. Die bessere Lösung ist eine Impedanztransformation durch eine "unsymmetrische" Konfiguration der an den Resonator angeschlossenen Kondensatoren. Ein erster Schätzwert für C_a ist 10 - 20% höher als die spezifizierte Lastkapazität, ein erster Wert für C_b ist mindestens das Vierfache des C_a -Wertes.

R_v sollte so groß gewählt werden, dass der zulässige Pegel der Quarzlast nicht überschritten wird. Mit den Schiebereglern für R_v und C_b sollte die Übertragungsfunktion für die richtige Resonatorlast und eine optimale Form der Resonanzkurve optimiert werden. Diese Einstellung ist nicht notwendigerweise diejenige mit der höchsten Spannungsverstärkung des Rückkopplungsnetzwerks, vorausgesetzt, der Inverter bietet eine ausreichende Verstärkung!



Bild 15
Pierce-Oszillator, symmetrische (22 pF / 22 pF / 300 Ω) und asymmetrische Wahl von C_a und C_b (18/110 pF)



Bild 16
Pierce-Oszillator, symmetrischer Wahl C_a und C_b (24/24 pF)

Wie man sieht, führt die unsymmetrische Konfiguration für C_a und C_b zu einer besseren Resonanz mit höherem Gütefaktor.

Der Pierce-Oszillator erfordert einen Quarz mit Lastkapazität, wenn keine zusätzlichen Induktivitäten in Reihe zum Resonator geschaltet sind.

Eine mögliche Schaltung für Obertonresonatoren ist in Bild 17 dargestellt.

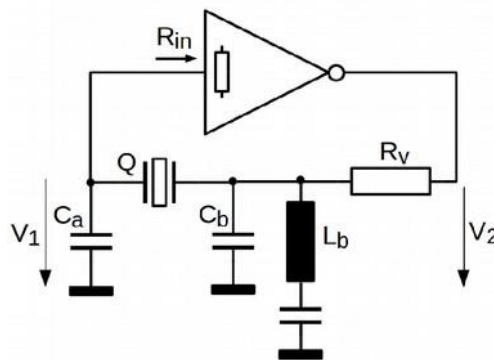


Bild 17
Pierce-Oszillator mit Inverter und
Rückkopplungsnetzwerk für Resonatoren
im Obertonmodus

Die GEYER-App bietet verschiedene andere Simulationsmöglichkeiten. Für verschiedene Arten von Kristallen, die in der Simulation verwendet werden sollen, oder andere Arten von Oszillatoren, wie z.B. der Colpitts-Oszillator, die auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden können.

Gerne stehen wir Ihnen bei Fragen und Anregungen sowie Verbesserungsvorschlägen unter +49 89546868-0 oder unter der E-Mail Adresse app@geyer-electronic.de zur Verfügung.