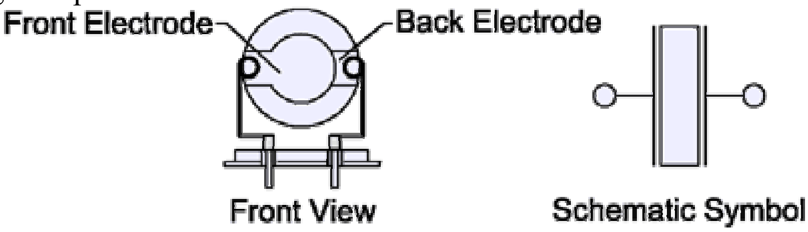
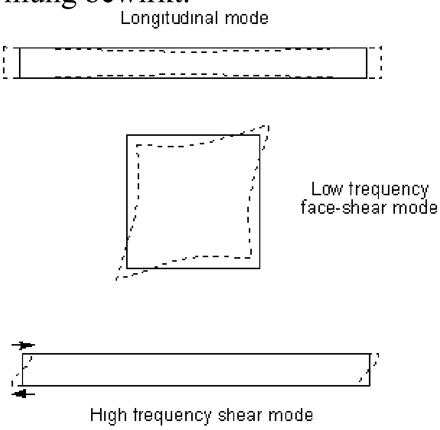
Der Schwingquarz

Der Schwingquarz ist ein elektromechanisches Bauelement, welches wegen des piezoelektrischen Effekts beim Anlegen einer elektrischen Spannung seine Größe ändert. Im Allgemeinen handelt es sich um dünne, scheibenförmige Plättchen aus Siliziumoxyd (SiO_2), auf welchen Elektroden aufgedampft sind.



Wird das Plättchen verformt, entstehen an den Elektroden elektrische Ladungen die eine elektrische Spannung bewirken. Wird eine elektrische Spannung an den Elektroden angelegt, entsteht eine mechanische Verschiebung im Quarzkristall welche eine mechanische Verformung bewirkt.



Eine Wechselspannung an den Elektroden verursacht ein Schwingen des Quarzes. Ist die Frequenz der Wechselspannung nahe einer mechanischen Resonanzfrequenz des Quarzes, wird die Amplitude der mechanischen Schwingung relativ groß. Die mechanischen Spannungen im Quarz verursachen dann eine sinusförmige elektrische Spannung an den Elektroden, welche die elektrische Impedanz zwischen den Elektroden beeinflusst. Diese Impedanz ist stark von der Frequenz des elektrischen Signals abhängig und in der Nähe der mechanischen Resonanzfrequenz dem Verhalten eines Serienschwingkreises ähnlich.

Die Plättchen haben auf Grund ihrer Masse eine Trägheit, für die für ihre Bewegung notwendige Kraft gilt $\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{d^2\vec{x}}{dt^2}$. Bei einer mechanischen Verformung treten innere Kräfte auf, wobei die Kräfte proportional zur Verformung x sind. $\vec{F} = s\vec{x}$, wobei s die „Federkonstante“, die Steifigkeit darstellt. Die bei der Verformung auftretende Reibungskraft ist proportional zur Geschwindigkeit, mit der die Verformung vonstatten geht, es gilt also $\vec{F} = \mu\vec{v} = \mu\frac{d\vec{x}}{dt}$, wobei µ der innere Reibungskoeffizient des Materials ist. Weil das Plättchen immer im energetischen Gleichgewicht ist, ist die Summe aller auftretenden Kräfte Null:

$$\vec{f}(t) = m\frac{d^2\vec{x}}{dt^2} + \mu\frac{d\vec{x}}{dt} + s\vec{x}$$

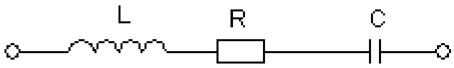
Geht man von einer harmonischen (sinusförmigen) Bewegung des Quarzes aus, kann dies Differentialgleichung mit Hilfe des Ansatzes $x = x_0 e^{j\omega t}$ gelöst werden. Substituiert man den Ansatz in die Differentialgleichung, erhält man

$$F(j\omega) = j\omega m + \mu + \frac{1}{j\omega\frac{1}{s}}$$

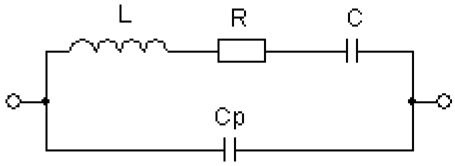
Vergleicht man diese Formel mit der Gleichung für die Impedanz eines Serienschwingkreises

$$Z(j\omega) = j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C}$$

erkennt man, dass die Masse m der Induktivität L, die innere Reibung μ dem ohmschen Widerstand R und die Federsteifigkeit 1/s der Kapazität C entspricht. Also gilt für die elektrische Ersatzschaltung



Beachtet man zusätzlich, dass zwischen den Anschlüssen des Quarzes eine Kapazität von einigen wenigen Pikofarad besteht, erhält man schließlich die Ersatzschaltung



$$Z(j\omega) = \frac{1 - \omega^2 LC + jR\omega C}{j\omega((C + C_p) - \omega^2 LCC_p + jR\omega CC_p)}$$

In der folgenden Tabelle sind typische Kennwerte von Schwingquarzen gegeben, die von ihrem Frequenz-Einsatzbereich abhängig sind.

Parameter	200 kHz	2 MHz	30 MHz	90 MHz
	Grundschwingung	Grundschwingung	Dreifache Grundschwingung	Fünffache Grundschwingung
R	2000 Ω	100 Ω	20 Ω	40 Ω
L	27 H	520 mH	11 mH	6 mH
C	0.024 pF	0.012 pF	0.0026 pF	0.0005 pF
C_p	9 pF	4 pF	6 pF	4 pF
Q	$20*10^3$	$20*10^3$	$20*10^3$	$20*10^3$

Die Berechnung der Resonanzfrequenzen eines 4 MHz-Quarzes mit

$R_s = 100\ \Omega$ L = 226.5592 mH C = 7 fF Cp = 4pF

Liefert zwei Frequenzen, bei welchen der Imaginärteil der Impedanz verschwindet. Vernachlässigt man in erster Näherung die Verluste, also den ohmschen Widerstand, erhält man aus dem Nullsetzen des Zählers

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

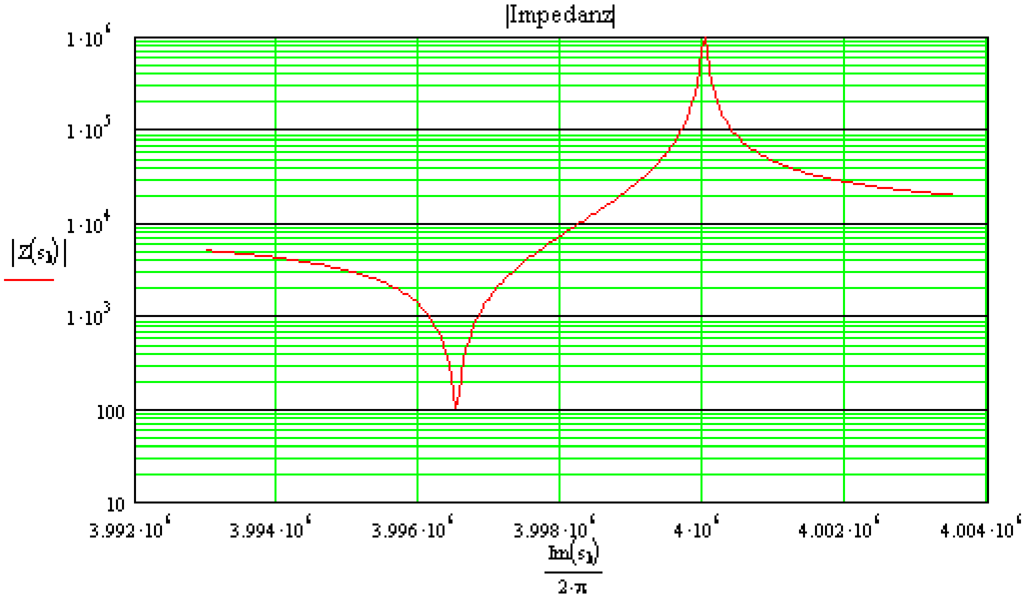
die Serienresonanzfrequenz des Quarzes, bei welcher der Quarz die geringste Impedanz aufweist. Der Imaginärteil wird auch dann verschwinden, wenn der Nenner unendlich groß wird. Daraus erhält man

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L\frac{CC_p}{C + C_p}}}$$

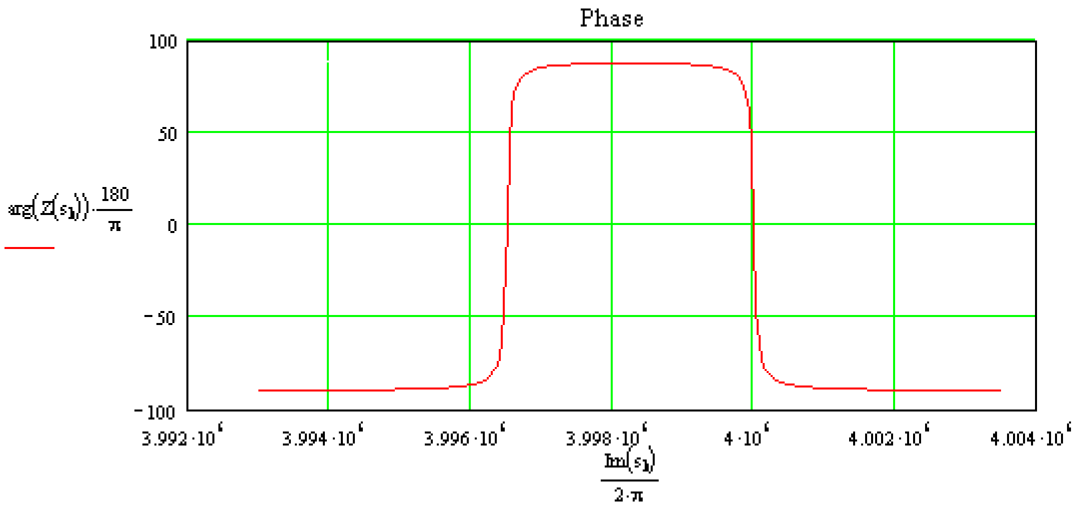
die Parallelresonanzfrequenz, bei welcher der Quarz die höchste Impedanz aufweist. ω_p ist stets größer als ω_s. Die wirksame Kapazität besteht bei der Parallelresonanzfrequenz aus der Reihenschaltung von C und C_p. Die wirksame Kapazität ist also immer kleiner als C alleine. Da die wirksame Kapazität bei der Serienresonanzfrequenz nur aus C alleine besteht, ist die Serienresonanzfrequenz immer niedriger als die Parallelresonanzfrequenz.

Serienresonanzfrequenz $f_s = 3996504$ Hz
Parallelresonanzfrequenz $f_p = 3999999$ Hz

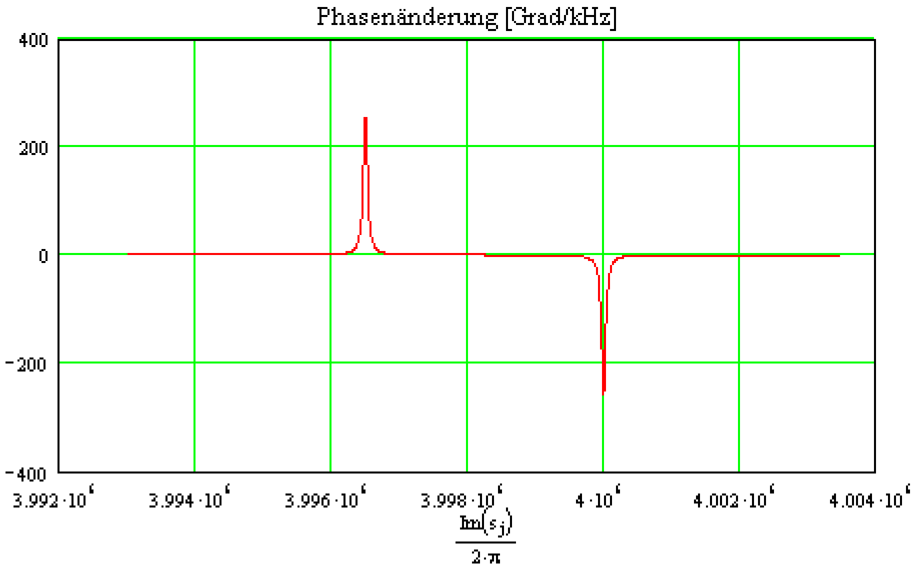
Unterhalb der Serienresonanzfrequenz zeigt der Quarz kapazitives Verhalten, im engen Bereich zwischen der Serien- und der Parallelresonanz zeigt er induktives Verhalten, oberhalb der Parallelresonanzfrequenz ist er wieder kapazitiv.



Im obigen Bild ist zu beachten, dass der Maßstab auf der Ordinate logarithmisch ist. Das kapazitive und induktive Verhalten ist im nächsten Bild besonders deutlich zu erkennen. In diesem ist die Phase (in Grad) der Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt.

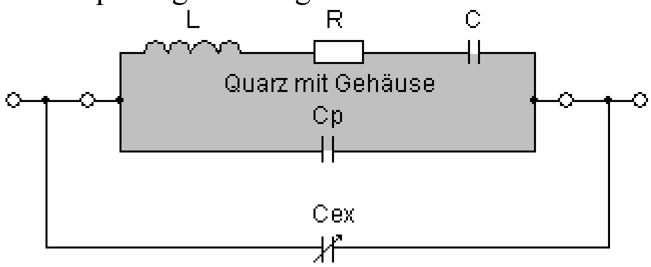


Ein wesentliches Maß für die Frequenzstabilität eines Oszillators ist die Empfindlichkeit, mit der das frequenzbestimmende Bauelement auf Frequenzänderungen reagiert. Da in der Schwingbedingung des Oszillators sowohl die Amplituden- als auch die Phasenbedingung erfüllt sein muss, kann mit einer hohen Phasenempfindlichkeit ein in der Frequenz stabiler Oszillator aufgebaut werden. Die Phasenänderung ist proportional der Güte Q des Schwingkreises, der die Schwingfrequenz bestimmt. Klassische LC-Oszillatoren haben eine etwa 500 bis 5000 mal geringere Güte und sind daher wesentlich weniger stabil als Quarzoszillatoren.



Ob der Oszillator auf der niedrigeren Serienresonanzfrequenz oder auf der höheren Parallelresonanzfrequenz schwingt, hängt von der Oszillatorschaltung ab. Es gibt Schaltungen, welche die Serienresonanz des Quarzes ausnutzen und andere, welche die Parallelresonanzfrequenz ausnutzen.

Die Parallelresonanzfrequenz kann durch die Parallelschaltung des Quarzes mit einem externen Kondensator verringert, „gezogen“ werden. Diese Ziehen erfolgt schon durch die Beschaltung des Quarzes mit der Oszillatorschaltung. Durch den Einbau eines Trimmkondensators kann die Oszillatorfrequenz genau eingestellt werden.



Die Empfindlichkeit der Resonanzfrequenz auf Änderungen des Kondensators C_{ex} ist

$$\frac{d\omega}{\omega} = -\frac{1}{2}\frac{C}{C_p + C_{ex}}\frac{dC_{ex}}{C_p + C_{ex}}$$

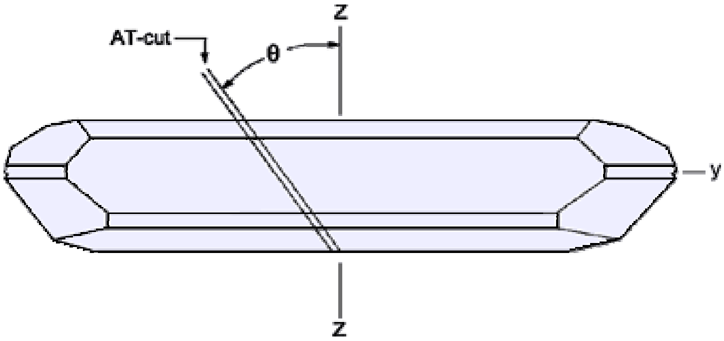
Ändert sich die Parallelkapazität $C_p + C_{ex}$ des Quarzes auf Grund der externen Beschaltung um p Prozent, ändert sich die Resonanzfrequenz um $-\frac{1}{2}\frac{C}{C_p + C_{ex}}p$ Prozent.

Bei dem oben angegebenen 4 MHz Quarz ergibt eine Vergrößerung der Parallelkapazität um +10 % eine Änderung der Parallelresonanzfrequenz um –0.00875 % = - 87.5 ppm.

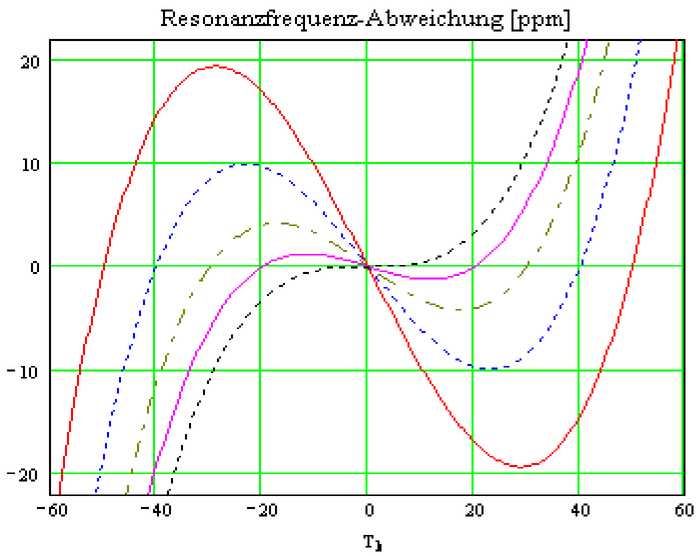
Die Serienresonanzfrequenz kann mit Hilfe der Serienschaltung eines Kondensators mit dem Quarz zu höheren Frequenzen gezogen werden. Das ist jedoch ein unübliches Verfahren und wird in der Praxis kaum angewendet.

Es ist leicht zu erkennen, dass die Resonanzfrequenz nur wenig auf externe Beschaltung reagiert. Daher ist der wichtigste Umwelteinfluss, die Temperaturabhängigkeit ein wichtiger Aspekt bei der Quarzauswahl.

Das Quarzplättchen wird aus einem (im Allgemeinen künstlich gezogenen) Quarzkristall geschnitten.

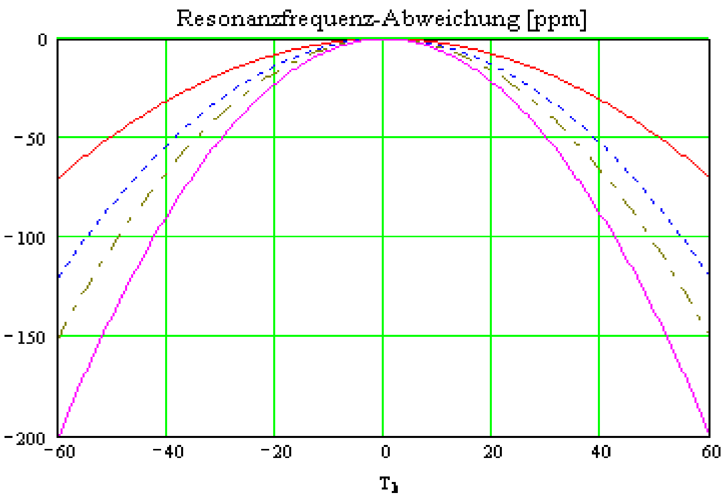


Die Lage der Schnittebenen zu den Kristall-Symmetrieachsen bestimmt im Wesentlichen die Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz.



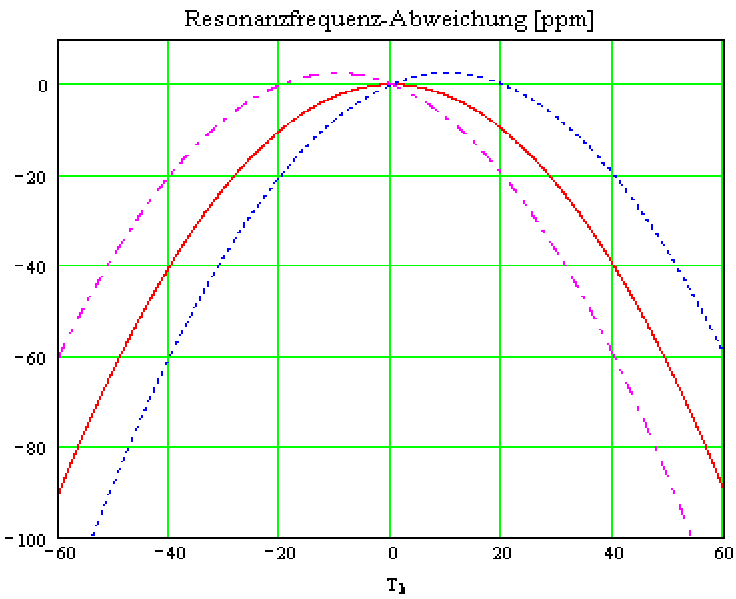
Die Temperaturabhängigkeit der AT-Schnitte zeigt das obige Bild. Die Kurven sind kubische Funktionen der Temperatur und sind vom Winkel, unter welcher der Quarz geschnitten wird, abhängig. Die unten dargestellten Verläufe erhält man durch Variation des Schnittwinkels um nur wenige Bogenminuten. Die äußeren Punkte auf der Kurve, bei der keine Abweichung auftritt nennt man Umkehrpunkte. Durch die Wahl des Schnittwinkels kann ein Umkehrpunkt frei gewählt werden, der andere Umkehrpunkt ergibt sich von selbst, weil sie symmetrisch zu einem Punkt im Bereich von 20°C bis 30°C liegen. Schwingquarze, die in einem temperaturstabilisierten Oszillator eingesetzt werden, sollten einen Umkehrpunkt bei genau der Temperatur haben, bei welcher der Quarz betrieben wird.

Im folgenden Bild sind die Temperaturabhängigkeiten der Resonanzfrequenz von DT- (oberste Kurve), E-, J-, M-, T- (strichlierte Kurve), XY-, NT- (strichpunktierte Kurve) und CT-Schnitten (unterste Kurve) dargestellt.



J-Schnitte werden bei NF-Quarzen im Frequenzbereich unter 10 kHz eingesetzt.
XY-Schnitte werden im Frequenzbereich von etwa 3 kHz bis zirka 85 kHz verwendet.
NT-Schnitte eignen sich um 10 kHz.
DT-Schnitte werden von 100 kHz bis 800 kHz eingesetzt.
CT-Schnitte sind im Bereich von 300 kHz bis 900 kHz vorgesehen.

Der BT-Schnitt hat das folgende Temperaturverhalten:



Im folgenden Bild sind die verschiedenen Schnitte im Bezug zu den Hauptachsen des Quarzkristalls dargestellt.