

2. **Eigenschaften von Schwingquarzen**

Dipl.Ing.W.Briese

2.1. **Einleitung**

In der Elektronik werden im zunehmenden Maße Oszillatoren hoher Frequenzkonstanz und Filter großer Flankensteilheit benötigt. Zur Realisierung derartiger Oszillatoren und Filter sind Kreise hoher Schwingungsgüte erforderlich. Die Eigenresonanz dieser Schwingkreise soll überdies auch möglichst unabhängig von der Temperatur und anderen Umwelteinflüssen sein und über eine lange Zeit unverändert bleiben. Diese Bedingungen werden im allgemeinen von mechanischen Resonatoren besser erfüllt, als mit elektrischen Kreisen. Der Schwingquarz als elektromechanischer Resonator erfüllt all diese Bedingungen in hervorragendem Maße. Es wurden wiederholt Versuche unternommen, Quarz durch andere piezoelektrische Materialien zu ersetzen, insbesondere durch piezokeramische Werkstoffe, die einen stärkeren Piezoeffekt haben. Aber gerade durch die sehr lose Ankoppelung der elektrischen Schaltung an die mechanische Schwingung wird ja beim Quarz die geringe Rückwirkung äußerer Einflüsse auf die mechanische Eigenresonanz erzielt. Darüber hinaus hat sich Quarz gegenüber anderen Materialien durch das Zusammentreffen mehrerer günstiger Eigenschaften als überlegen erwiesen, wie zum Beispiel die geringe Dämpfung des kristallinen Materials, die außerordentliche gute mechanische und dynamische Stabilität und geringe Temperaturabhängigkeit. Durch die Anwendung geeigneter mechanischer Schwingungsformen und entsprechender kristallographischer Orientierungen (Quarzschnitte) können in einem weitem Frequenzbereich Quarzschwinger technisch realisiert werden. Bedingt durch die jeweils erregte Schwingungsform ergeben sich für bestimmte Frequenzbereiche typische elektrische Werte (Ersatzdaten) der Schwingquarze.

2.2. **Die bei Schwingquarzen angewendeten Schwingungsformen**

Die Resonanzfrequenz der Quarzresonatoren ist wie bei allen mechanischen Schwingern, bei vorgegebenen Materialkonstanten durch die mechanischen Abmessungen bestimmt. Diese Abmessungen sind in Richtung tiefer Frequenz durch die genormten Größen der Schwingquarzgehäuse begrenzt. Die obere Frequenzgrenze ist für die unterschiedlichen Schwingungsmoden jeweils durch eine vernünftige Herstellbarkeit der für hohe Frequenzen in den Abmessungen klein werdenden Reso-

natoren gegeben. Von tiefen zu hohen Frequenzen gehend, werden die Schwingungsformen Biegung, Dehnung, Flächenscherung und Dickenschерung angewandt.

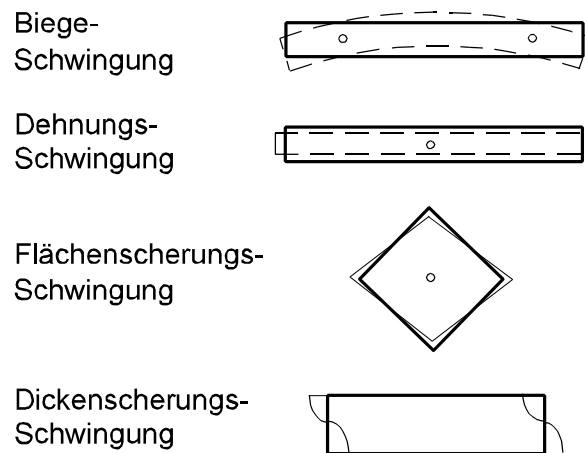


Bild 2.1 Schwingungsformen

Stimmgabelquarze sind im Wesen den Biegungsschwingern zuzuordnen. Das Anwendungsspektrum der Schwingquarze hat sich in letzter Zeit, auch begünstigt durch die Möglichkeiten der integrierten Schaltungstechnik, deutlich in den Bereich der hochfrequenten Dickenschwingungsschwinger verlagert. Niedere Frequenzen werden vorteilhafter durch Frequenzteilung hochfrequenter Quarzoszillatoren gewonnen. Die Schwingungsformen niederfrequenter Quarze sollen hier dennoch kurz behandelt werden, um ein vollständiges Bild zu vermitteln (Bild 2.1). Auch werden tieffrequente Schwinger in Filterschaltungen und als Mikroresonatoren in integrierten Oszillatoren verwendet.

2.3 Das Quarzrohmaterial

Die mechanischen Resonatoren der Schwingquarze werden aus Quarz, der einkristallinen Variante des Siliziumdioxid SiO_2 , hergestellt. Nur die α -Modifikation von Quarz hat piezoelektrische Eigenschaften. Siliziumdioxid tritt in der Natur in mehreren Zustandsformen auf. Obwohl 14% der Erdoberfläche aus SiO_2 bestehen, kommt die einkristalline Zustandsform, Quarz oder auch Bergkristall genannt, nur sehr selten vor. Besonders selten sind große, von Verwachsungen und Verzwillingungen freie Kristalle, die zur wirtschaftlichen Produktion von Schwingquarzen benötigt werden. Verwachsungen sind Nebenkristalle anderer Achsrichtung innerhalb des Hauptkristalls, Verzwillingungen sind Zonen mit verpoltem piezoelektrischen Effekt. Durch Erhitzen des Kristalls über die Umwandlungstemperatur von 573°C wandelt der α -Quarz in die β -Modifikation. Beim Abkühlen kehrt der Quarz in die α -Modifikation zurück, jedoch nicht einheitlich in die gleiche "Händigkeit". Das heißt, ein ehemals

“linksdrehender” Quarz beinhaltet Teile mit einem rechtsdrehenden Sinn der Molekülspirale der Elementarzelle (Verzwilligung). Die Folge sind unterschiedliche Polaritäten des Piezoeffektes. In der ersten Zeit der Schwingquarzfertigung wurden geeignete Quarzkristalle aus Madagaskar und Brasilien bezogen.

Der wachsende Bedarf an einwandfreien Quarzkristallen wuchs schnell, sodaß schon früh daran gedacht wurde, Quarzkristalle zu synthetisieren. Die geradezu groteske Rohquarzknappeheit zwang 1942 zu fieberhaften Arbeiten an diesem Problem. 1964



Abb. 2.2 Natürliche Quarzkristalle

begann die Großproduktion von synthetischen Quarzen. Heute werden Schwingquarze fast ausschließlich nur noch aus synthetischem Material gefertigt. Die Hydrothermalsynthese erfolgt in vertikalen Autoklaven. Der Autoklav ist mit einer Natriumhydroxid-Lösung gefüllt. Im unteren Bereich des Autoklaven befindet sich in der Lösung kristalliner Quarzbruch, wie er sonst zur Herstellung von Quarzglas verwendet wird. Im oberen Bereich des Autoklaven befinden sich Keimplatten. Der im unteren Teil des Autoklaven befindliche Quarzbruch geht bei einem Druck von etwa $1000 - 1800 \text{ kp/cm}^2$ und einer Temperatur von etwa 390°C in Lösung. Durch Wärmekonvektion strömt die übersättigte Lösung in den oberen Teil des Autoklaven und kristallisiert dort bei einer Temperatur von etwa 350°C an den Keimplatten aus. Die Keimplatten sind etwa 1mm dick (Z-Achse), ihre Länge ca. 180 mm ist die Y-Achse eines Mutterkristalls, die Breite in X-Richtung je nach Verfahren 5 bis 50 mm. Die Richtung des größten Kristallwachstums ist die Z-Achse, bei natürlichen Quarzen die größte Abmessung des Kristalls. Die Kristallbildung erfolgt also überwiegend auf der Z-Fläche. Die normale Wachstumsrate liegt bei etwa 0,2 - 1mm pro Tag. Im Allgemeinen dauert der Wachstumsprozeß etwa 40 - 80 Tage. Unter diesen Bedingungen synthetisierte Quarzkristalle sind frei von Verwachsungen und Verzwilligungen.

Die erreichbare Schwingungsgüte Q eines aus dem Material speziell hergestellten Referenzquarzes 5MHz im 5.Oberton, ist größer als $3 \cdot 10^6$, also vergleichbar mit der



Abb.2.3 Synthetische Quarzkristalle

Schwingungsgüte von Naturquarz. Die Güte ist abhängig von der Wachstumsgeschwindigkeit. Dementsprechend sind in unterschiedlichen Preislagen Rohquarze verschiedener Sollgüten am Markt. Bei höheren Wachstumsgeschwindigkeiten werden im Kristallgitter Alkali-Fremdionen eingebaut, die eine Güteverschlechterung bewirken. Zur Gütekontrolle wird die durch diese Fremdionen bewirkte Infrarotabsorption bei einer Wellenzahl von 3500 /cm im Vergleich zur Absorption bei 3800/cm gemessen. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Infrarotabsorption und der maximal möglichen Schwingungsgüte des Materials bei einer Resonatorfrequenz von 5 MHz: $10^6/Q = 0,114 + 7,47\alpha - 0,45\alpha^2$ mit $\alpha = 1/d \log(T_{3800}/T_{3500})$ und d =Dicke der Probe in cm (Sawyer Research Products,inc). Starke, ionisierende Strahlungen (Röntgenstrahlung) können in Bezirken mit eingebauten Aluminiumionen Veränderungen im Kristallgitter hervorrufen. Zonen mit starken Al-Konzentrationen im Kristallgitter werden nach starker Bestrahlung durch Graufärbung sichtbar (in der Natur = Rauchquarz). Werden Schwingquarze im Betrieb starker Strahlung ausgesetzt, ändert sich deren Resonanzfrequenz (Alterung). Für Anwendungen in der Raumfahrt oder Satellitentechnik werden diese Al-Ionen in einem elektrischen Feld von 500V/cm bei einer Temperatur von 500°C entfernt (Swept Quartz-Crystal).

2.4 Die kristallographischen Achsen

Ausgehend von der Gestalt eines natürlichen, im Querschnitt sechseckigen Quarzkristalls, und der in der Kristallographie üblichen Festlegung der senkrecht aufeinanderstehenden Koordinaten x , y und z , definieren wir als Z -Achse die durch die Spitze des Kristalls gehende gedachte Achse (Bild 2.6). Die Z -Achse wird auch optische Achse genannt, weil in ihrer Richtung die optische Erscheinung der Doppelbrechung zu beobachten ist. Die senkrecht hierzu stehende und durch eine

Ecke des hexagonalen Prismas gehende X-Achse wird auch elektrische Achse genannt, weil durch Deformation des Kristalls in dieser Richtung eine elektrische Ladung auftritt (direkter Piezoeffekt). Die Y-Achse steht wiederum senkrecht zu den beiden anderen Achsen und geht damit durch eine Fläche des Kristalles, (Bild 2.4). Bei Anlegen einer elektrischen Ladung in Richtung der X-Achse tritt eine Elongation in Richtung der Y-Achse auf (indirekter Piezoeffekt). Die Y-Achse wird deshalb auch die mechanische Achse genannt.

2.5 Der piezoelektrische Effekt

Das Wort Piezo stammt aus dem griechischen “pizein”. Es bedeutet drücken oder pressen. Piezoelektrisch heißt also elektrische Ladung durch mechanischen Druck. Durch mechanische Deformation bestimmter Kristalle entsteht auf deren Oberflächen eine elektrische Ladung. Diese Erscheinung nennt man den direkten piezoelektrischen Effekt. Umgekehrt, die Entstehung einer Deformation des Kristalles auf Grund einer elektrischen Ladung, nennt man den umgekehrten piezoelektrischen Effekt. Beide Effekte sind streng proportional. Voraussetzung für die piezoelektrische Eigenschaft eines Kristalles ist das Vorhandensein einer polaren Achse. In der Kristallographie nennt man eine Kristallachse polar, wenn bei Drehung um diese Achse die Strukturzelle nicht deckungsgleich ist. Man spricht auch von einer unsymmetrischen Faltungsebene. Beim Quarz ist die X-Achse die polare Achse. In Bild 2.4 ist die Strukturzelle von Quarz vereinfacht dargestellt. Die kleinen Kreise stellen hierbei die positiv geladenen Si-Ionen dar, die größeren Kreise die negativ geladenen O-Ionen

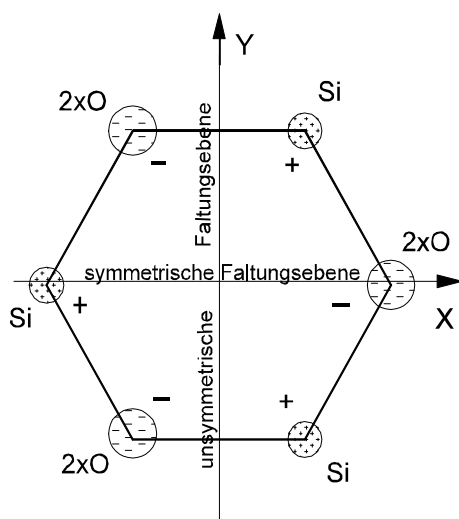


Bild 2.4 vereinfachte Strukturzelle von Quarz

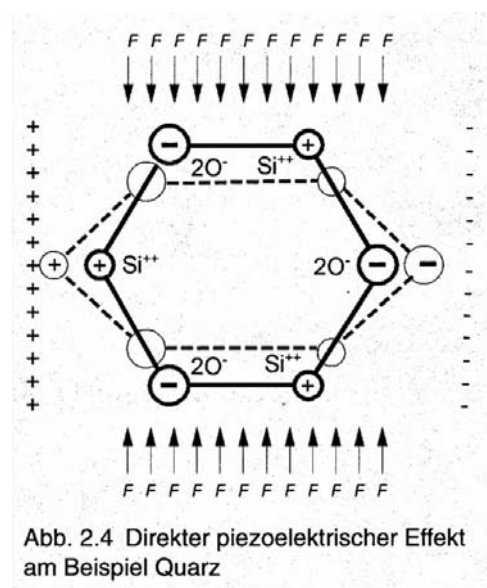


Abb. 2.4 Direkter piezoelektrischer Effekt am Beispiel Quarz

des SiO_2 -Kristallgitters. Verformt man den Kristall durch Druck in Richtung der X-Achse, verschieben sich die positiven und negativen Ionen gegeneinander. Es entsteht eine elektrische Polarisation in Richtung der X-Achse. Die Folge ist eine elektrische Ladung auf den entsprechenden Oberflächen des Kristalls, in diesem Fall auf den X-Flächen. In Richtung der Y-Achse kann keine Polarisation erfolgen, weil diese Achse eine symmetrische Faltungsebene darstellt. Bei Druck- oder Zugbeanspruchung in Richtung der Y-Achse (F) in Bild 2.5, entsteht jedoch ebenfalls in X-Richtung eine Polarisation. Dieser Vorgang wird der transversale Piezoeffekt genannt. Die Y-Achse wird dementsprechend auch die mechanische Achse genannt. Die geschilderten piezoelektrischen Wirkungen sind reversibel. Das heißt, unter Einwirkung eines elektrischen Feldes in Richtung der X-Achse deformiert sich der Kristall in Richtung der Y-Achse. Man nennt dies auch den indirekten Piezoeffekt.

Bedingt durch seine Kristallstruktur, haben wir beim Quarzkristall drei völlig gleichwertige X-Achsen, die unter einem Winkel von 120° zueinander stehen. Zu

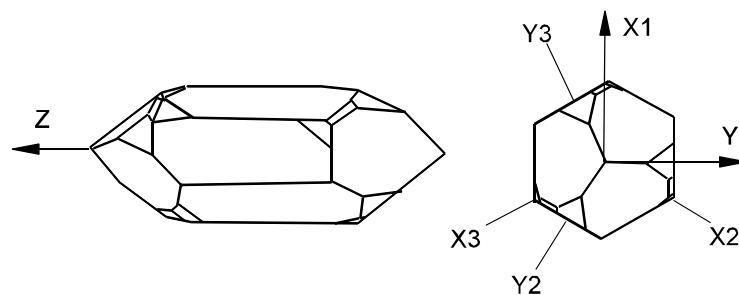


Bild 2.6 Die Kristallachsen beim Quarz

jeder X-Achse gehört jeweils eine Y-Achse (Bild 2.6).

Die Werte der piezoelektrischen und mechanischen Parameter sind von der Richtung ihrer Wirkung in Bezug auf die Kristallachsen abhängig. Die richtungsabhängigen Komponenten werden deshalb sinngemäß indiziert, entweder mit der Bezeichnung der Achse, oder bei den Druckkomponenten durch Zählung 1; 2; 3 für die Richtungen X; Y; Z. Die Zählung der Scherkomponenten (Schubspannungen) erfolgt entsprechend mit den Indizes 4; 5; 6. Flächen werden mit der Bezeichnung der Achse indiziert, die senkrecht zu der betreffenden Fläche steht (Bild 2.7).

Vorausgesetzt, daß in gleicher, oder in anderer Richtung keine weiteren Kräfte herrschen, können wir für den longitudinalen direkten Piezoeffekt schreiben:

$$Q_x = d_{11} \cdot F_x = d_{11} \cdot F_{11} \quad (1)$$

Unter der Einwirkung der Kraft F_x (in X-Richtung) entsteht die Ladung Q_x auf der X-Fläche. Proportionalitätsfaktor ist der Piezoelektrische Modul in X-Richtung d_{11} . Mit der Kapazität der Elektroden C_e können wir die an den Elektroden liegende elektrische Spannung U errechnen:

$$U_x = \frac{d_{11} \cdot F_x}{C_e + C_L} \quad (2)$$

C_e = Elektrodenkapazität, C_L = belastende Kapazität der Meßanordnung.

Die durch die Kraft F erzeugte Deformation wird durch das Hookesche Gesetz allgemein beschrieben:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{oder} \quad \frac{\Delta l}{l} = \alpha \frac{F}{A} \quad (3)$$

ε = Dehnung; σ = mech. Spannung; E = Dehnmodul (Elastizitätsmodul);

α = Dehnzahl (= $1/E$)

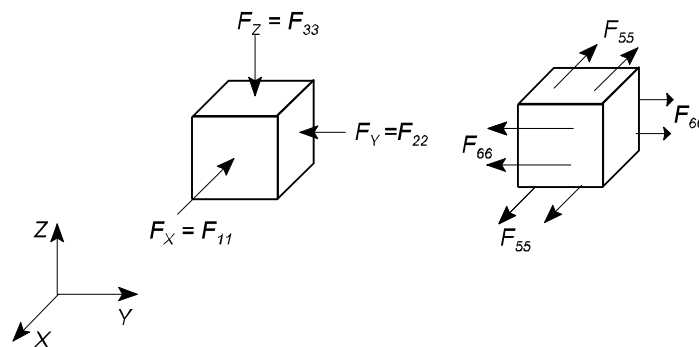


Bild 2.7 Indizierung der Kräfte

Die durch eine Normalspannung bewirkte Elongation Δl in Richtung der angreifenden Kraft hat eine Verkürzung Δd quer zur Kraftrichtung zur Folge. Das Verhältnis der relativen Längenänderungen zueinander ist die Poissonsche Zahl oder Querkontraktion μ :

$$\frac{\Delta d}{d} \div \frac{\Delta l}{l} = \mu \quad (4)$$

Bei anisotropen Körpern werden die elastischen Eigenschaften stark richtungsabhängig, d.h. bei Deformation ist jede der 6 Komponenten des Spannungstensors

eine lineare Funktion der zugehörigen 6 Komponenten des Deformationstensors und umgekehrt. Nach diesem verallgemeinerten Hookeschen Gesetz erhalten wir 36 Proportionalitätskonstanten, die den Zusammenhang zwischen mechanischer Spannung und Verformung beschreiben. Mit zunehmender Symmetrie des betreffenden Kristalls verringert sich diese Anzahl rasch, bei Quarz auf 6. Entsprechend Bild 2.7 erhalten wir die Komponenten:

Die Kompressionskomponenten der elastischen Spannung $\sigma = X_x; Y_y; Z_z$.

Die Scherkomponenten der elastischen Spannungen $\sigma = Y_z; Z_x; X_y; = Z_y; X_z; Y_x$.

Die Komponenten der Dehnung $\epsilon = x_x; y_y; z_z; y_z; z_x; x_y$.

Die Komponenten der Dehnungskoeffizienten $\alpha = s_{ij}$

Die Komponenten des Dehnungsmoduls $E = c_{ij}$

Das Hookesche Gesetz lautet damit allgemein: $x = -sX$ oder $X = -cx$

Für Quarz können wir nun die Zusammenhänge zwischen Spannung, Deformation Polarisation und Feldstärke beschreiben:

Die Deformation als Wirkung einer elektrischen Feldstärke E_x :

$$\begin{aligned} x_x &= d_{11} E_x & Y_y &= -d_{11} E_{xz} & z_z &= 0 \\ y_z &= d_{14} E_x & z_x &= -d_{14} E_y & x_y &= -2d_{11} E_y \end{aligned} \quad (5)$$

Die Polarisation:

$$\begin{aligned} P_x &= d_{11} X_x - d_{11} Y_y + d_{14} Y_z \\ P_y &= -d_{14} Z_z - 2d_{11} X_y \\ P_z &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Die Ladung:

$$\begin{aligned} Q_x &= d_{11} A_x X_x = d_{11} F_x \\ Q_x &= -d_{11} A_x Y_x = -d_{11} F_x (A_x/A_y) & d_{11} &= -d_{12} \end{aligned} \quad (7)$$

2.6 Die Quarzschnitte

Zur Erzielung bestimmter Eigenschaften, meist eines minimalen Temperaturganges der Resonanzfrequenz und gleichzeitig einer guten elektrischen Anregbarkeit der gewünschten Schwingungsform über den Piezoeffekt, ergeben sich optimale Winkel (Schnittwinkel) unter dem die Schwingkörper (Resonatoren) aus dem Quarzkristall

herausgeschnitten werden, Bild 2.8. Die Bezeichnung der Schnitte entstand aus der alphabetischen Aufzählung der Schnittwinkel, die zu einem minimalen Temperaturkoeffizienten bei Raumtemperatur führten. Der Buchstabe T steht für Temperaturkompensiert. Eine andere Regel bezeichnet die Schnitte nach der kristallographischen Achse, die normal oder annähernd normal zur Hauptoberfläche des Schwingers steht. Es gibt noch Spezialschnitte, z. B. mit geringer Verkopplung zu anderen Schwingungsmoden (AC-Schnitt) oder mit besonders geringer Frequenzänderung bei mechanischen Beanspruchungen (SC-Schnitt = stress compensated).

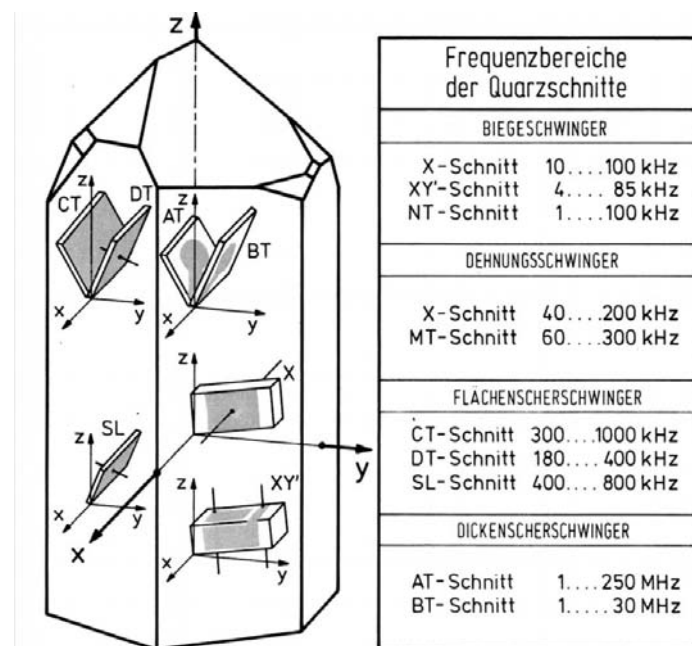


Abb. 2.8 Quarzschnitte

2.7 Dehnungsschwinger

Dehnungsschwinger oder Longitudinalschwinger sind plattenförmige Schwinger, die in Richtung ihrer längeren Abmessung (in y-Richtung) schwingen, d. h. durch das in x-Richtung angelegte elektrische Wechselfeld in Richtung der y-Achse elongieren. Zur Bestimmung der Eigenresonanz wird im allgemeinen die Differentialgleichung $m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0$ gelöst. Anschaulicher kann man von einer akustischen Welle ausgehen, die im Zentrum des Schwingers erzeugt wird. Diese Welle schreitet in ihrer Ausbreitungsrichtung mit der Schallgeschwindigkeit $v = \sqrt{1 / \rho S}$ fort, im Fall der Längendehnung in Längsrichtung des Resonators. An den Enden des Resonators erfolgt eine Totalreflexion der Welle. Durch Überlagerung der hin- und

rücklaufenden Welle entsteht im Resonanzfall eine stehende Welle, nämlich wenn die Resonatorlänge ein ganzes Vielfaches der halben Wellenlänge ist: $l = n \cdot \pi / 2$. Mit der Schallgeschwindigkeit erhalten wir:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{22}}} \quad (8)$$

Mit den Materialkonstanten der Dichte ρ und der elastischen Steifigkeit in der Y-Richtung s_{22} wird die Frequenzkonstante $N = f \cdot l = 2808 \text{ kHz} \cdot \text{mm}$. Da die Resonanzfrequenz f nur von der Länge des Resonators abhängt, sind die Breiten- und Dickenabmessungen mit Einschränkungen durch bestimmte Störschwingungen und Nebenresonanzen frei wählbar. Hierdurch sind die Werte im Ersatzschaltbild, die Ersatzdaten in weiten Grenzen realisierbar. Längendehnungsschwinger werden hauptsächlich für den Einsatz in Quarzfiltern hergestellt. Neuerdings werden Dehnungsschwinger auch als Mikroresonatoren in Hybrid-Schaltkreisen integriert.

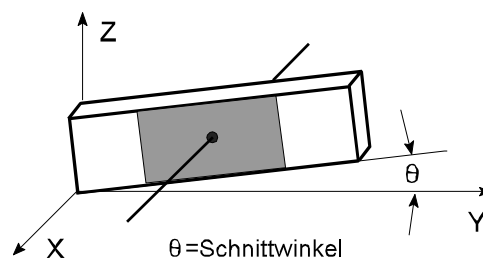


Bild 2.9 Dehnungsschwinger

Die elektrischen Eigenschaften von Dehnungsschwingern können aus den Materialkonstanten und den Abmessungen errechnet werden:

$$C_0 = 0,402 \frac{b_e l_e}{d_q} \quad C_1 = \frac{C_0}{r} \quad (9)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad Q = \frac{1}{\omega_1 R_1} \quad (10)$$

Die Temperaturabhängigkeit der Frequenz entspricht einer Parabel:

$$\frac{\Delta f}{f} = -a(T - T_0) \quad (11)$$

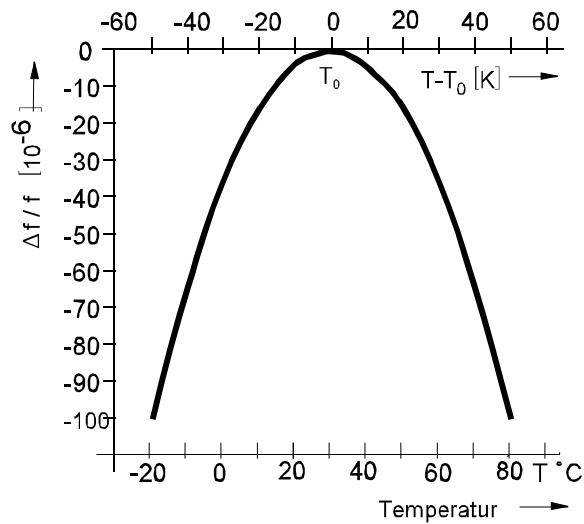


Bild 2.10 Dehnungsschwinger,
Temperaturabhängigkeit der Frequenz

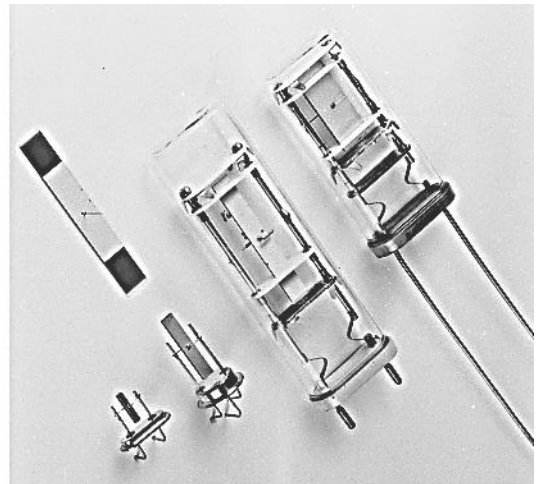


Abb. 2.11 Dehnungsschwinger

Typische Ersatzdaten von Dehnungsschwingern:

	evakuierte Gehäuse	Normaldruck	Microquartz
R_r	100 ... 300	300... 1000	5000 ... 10000
C_0/ C_1	120 ... 160	120 ... 160	130 ...500
L_1	20 ... 40 H	20...40 H	100....200 H
T_0	0 ... 45 °C	0 ... 45 °C	25....40 °C
a	$3,8...4,5 \cdot 10^{-8} / ^\circ C^2$	$3,8...4,5 \cdot 10^{-8} / ^\circ C^2$	$3,8 \cdot 10^{-8} / ^\circ C^2$

2.8 Biegungsschwinger

Biegungsschwingungen können erregt werden, indem X-Schnitt-Dehnungsschwinger

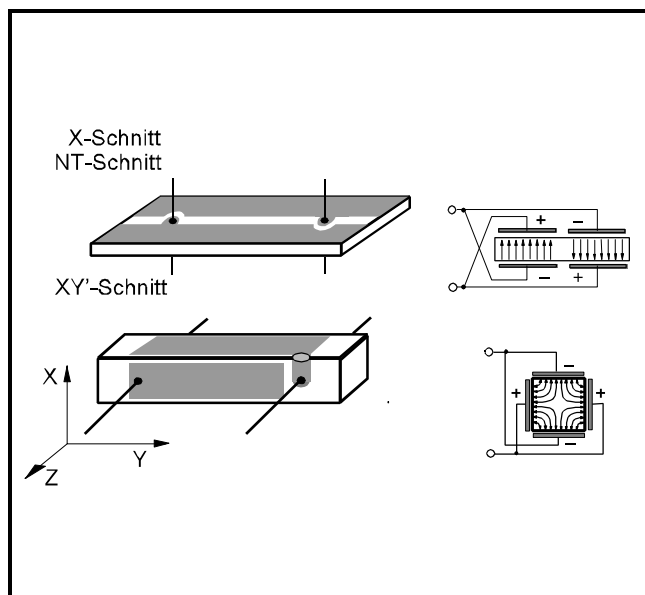


Bild 2.12 Erregung von Biegeschwingungen



Abb. 2.13 Biegungsschwinger

mit zwei gegenphasig angeschlossenen Elektroden versehen werden, so daß zwei entgegengesetzte Felder in x-Richtung auftreten. Die hierdurch erzwungene Biegung in z-Richtung hat allerdings einen ungünstigen Temperaturegang der Resonanzfrequenz. Dieser Temperaturegang kann durch eine zusätzliche, zweite Drehung des Schnittes um die y-Achse kompensiert werden (NT-Schnitt). Zu besseren Ergebnissen gelangt man mit dem allerdings hochohmigeren XY'-Schnitt. Bei diesem Schnitt wird durch die Quersfelderregung des quadratischen Stabes eine Biegung in x-Richtung mit den besseren Temperatureigenschaften erzwungen, Bild 2.12

Aus der Gleichung für die Frequenzkonstante

$$N = f \cdot l = \frac{b}{l} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{22}}} \frac{(2n-1)^2 \pi}{8\sqrt{12}} \quad (12)$$

ist ersichtlich, daß die Frequenz von zwei Dimensionen, der Länge l und der Breite b des Schwingers bestimmt ist. Hierdurch ist man in der Lage, auch bei niederen Frequenzen kleine Schwingquarze herzustellen, die dann allerdings sehr hochohmig sind.

2.9 Stimmgabelquarze

Die bekannte Form der Stimmgabel mit Stiel stammt von dem englischen Gardetrompeter John Shore. In der Musik hat die Stimmgabel ihre große Bedeutung dank ihrer hohen Schwingungsgüte (Schwingungsdauer nach dem Anschlagen) und der guten Frequenzkonstanz. Bereits 1880 wurde von R.Koenig (Wied. Ann. Bd. 9) eine Uhr mit elektrisch erregter Stimmgabel beschrieben. Aus Lord Rayleigh's Veröffentlichungen aus dem Jahr 1907 (Phil. Mag. Bd. 13) und den Angaben von Eccles (Proc. Phys. 1919) gehen erste Anwendungen elektronisch erregter Stimmgabeln zur Frequenzmessung hervor. Für die Verwirklichung des Gleichwellen-Rundfunks wurden 1927 Metallstimmgabeln zur Steuerung der Senderfrequenzen eingesetzt. Nach Chladni (Akustik, Ziff. 99, Leipzig 1802) kann man sich die Stimmgabel als einen gebogenen Stab vorstellen, der Biegeschwingungen ausführt. Allerdings liegen die Schwingungsknoten enger beieinander. Bei einer Stimmgabel mit Stiel führt der im Schwingungsbauch ansetzende Stiel Longitudinalschwingungen aus. Lord Rayleigh wies bereits auf die Möglichkeit der Entkopplung des Stiels durch geeignete Formgebung der Gabelzinken hin. Nach diesen Vorstellungen müßte die Resonanzfrequenz der Eigenresonanz der Biegeschwingung entsprechen.

$$f = \kappa \frac{b}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (13)$$

Die Frequenz ist von der Zinkenlänge und Breite abhängig. Die Zinkendicke hat keinen Einfluß auf die Frequenz, wohl aber auf den Temperaturgang der Frequenz. Von zahlreichen Autoren sind Korrekturfaktoren für die Errechnung der Eigenfrequenz der Gabelschwingung angegeben worden, sie gelten aber immer nur für eine bestimmte Formgebung der Zinken. Die Obertöne der Gabelresonanzen verhalten sich zum Grundton wie

1: 6,25; 18,3; 35,6 (symmetrische Schwingung)

1: 12,2; 23,5 (unsymmetrische Schwingung)

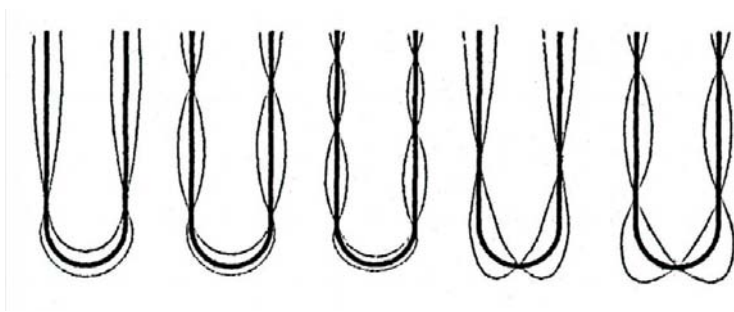


Bild 2.14 Obertöne bei Gabelschwingern

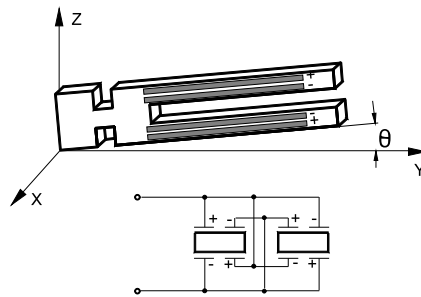


Bild 2.15 X-Schnitt - Gabelschwinger

2.9.1 Gabelschwinger im X-Schnitt

Im einfachsten Fall wird die Gabel wie ein X-Schnitt-Biegeschwinger aus dem Kristall geschnitten. Es tritt der gleiche Nachteil eines ungünstigen Temperaturganges der Frequenz auf. Durch geeignete Formgebung kann der Gabelstiel entkoppelt werden, sodaß die Gabel am Fuß dämpfungsarm montiert werden kann. Diese Maßnahme ist wirtschaftlich nur bei der Herstellung im Ätzverfahren möglich. Das Bild 2.15 zeigt einen Gabelschwinger im X-Schnitt. Schnittwinkel und Elektrodenanordnung entsprechen den X-Schnitt-Biegeschwingern.

2.9.2 Gabelschwinger im XY'-Schnitt

Wie unter XY'-Biege-Schwingern beschrieben, wird die Erregung der Biegebewegung durch eine Elektrodenanordnung zur Querfelderregung realisiert. Bei dünnen, im Ätzverfahren hergestellten Gabeln wird das Querfeld durch zwei sehr schmale Elektroden an den Rändern der Gabeln erzeugt (Bild 2.17).



Abb. 2.16 Gabelschwinger

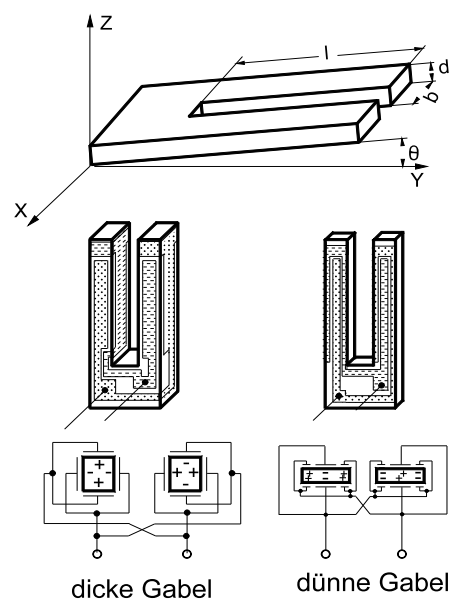







Bild 2.17 XY'-Schnitt-Gabelschwinger

2.9.3

Elektrische Eigenschaften von Stimmgabelquarzen

Gehäuse und Abmessungen	*	f kHz	R _r kΩ	C ₀ pF	C ₁ fF	P μW	T ₀ °C
 8,1×3,8×1,6	Ä	10	1000	1-3	3,8	0,5	30
	Ä	32	100	1-3	2,3	1	25
	Ä	200	10	1-3	0,8	1	10
Oberton	Ä	200	5	1-3	2,5	1	22
Oberton	Ä	500	10	1-3	0,8	1	40
 6,7×2,5×1,5	Ä	18	200	1-2	3,5	0,5	18
	Ä	32	100	1-2	2,3	1	25
	Ä	200	20	1-2	0,8	1	10
Oberton	Ä	200	8	1-2	2,5	1	22
Oberton	Ä	500	12	1-2	0,2	1	40
 5,0×1,9×1,1	Ä	32	50-80	1,4	2,4	1	25
 8,0×3,1∅	Ä	32	18-35	0,9	2,1	1	25
6,1×2,0∅	Ä	32	30-42	1,0	2,3	1	25
5,1×1,5∅	Ä	32	35-50	1,0	2,3	1	25
4,3×1,1∅	Ä	32	45-60	1,0	2,1	1	25
 8,3×3,1∅	S	32	30	2,0		1	25
6,1×2,0∅	S	32	40	1,8		1	25
5,1×1,5∅	S	32	50	1,0		1	25

* Herstellung in Ätztechnik = Ä
gesägt = S

Der Temperaturgang der Frequenz entspricht wie bei den Biegungsschwingern einer Parabel:

$$\Delta f/f = -a(T-T_0)^2$$

Die Parabelöffnungskonstante a liegt bei 0,038...0,045 ppm/°C²

2.10. Flächenscherschwinger

Die Resonanzfrequenz der Flächenscherschwinger ist durch die Abmessungen der Kantenlängen der meist quadratischen oder rechteckigen Resonatoren bestimmt. Für die unterschiedlichen Schnittrichtungen der verschiedenen Flächenscheringstypen ergeben sich mit den richtungsabhängigen elastischen Werten s_{55} unterschiedliche Frequenzkonstanten N . Hieraus resultieren die bevorzugten Frequenzbereiche für die in diesem Frequenzbereich meist benutzten Schwingquarzgehäuse HC-6/U:

Schnitt	Frequenzbereich	$N = f \cdot l$
DT - Schnitt	180 bis 350 kHz	2070 kHz mm
CT - Schnitt	300 bis 1000 kHz	3070 kHz mm
SL - Schnitt	400 bis 800 kHz	4600 kHz mm

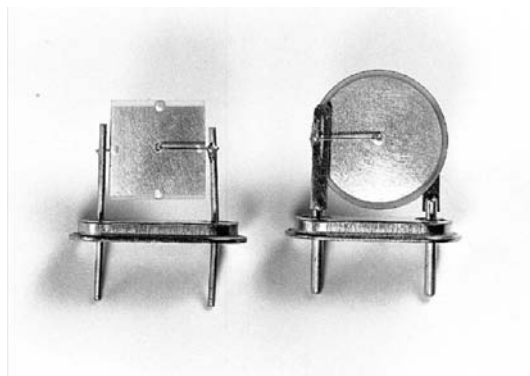


Abb. 2.18 Flächenscherschwinger

Die Resonatordicke d bestimmt die Größe der statischen und dynamischen Kapazität im Ersatzschaltbild und damit bei einer bestimmten Schwingungsgüte $Q = 1/2 \pi f R_1 C_1$ den Resonanzwiderstand R_1 . Für Oszillatoranwendungen mit meist höheren Quarzbelastungen werden dickere Resonatoren hergestellt, für Filteranwendungen, bei denen bei kleiner Belastung eine möglichst große dynamische Kapazität C_1 erwünscht ist, kommen dünnere Quarzresonatoren zum Einsatz.

Durch Evakuieren der Schwingquarzgehäuse kann die Dämpfung des Resonators

herabgesetzt werden. "Vakuumquarze" sind daher niederohmiger, aber nicht so hoch belastbar, wie Quarze mit Innertgas gefüllten Gehäusen.

Wie auch bei den Biegeschwingern und Dehnungsschwingern, werden die Vibratoren in ihrem Schwingungsknoten montiert (gehalten). An der Stelle des Schwingungsknotens ist auf dem Vibrator ein Drahtpaar im allgemeinen durch Löten befestigt. Mit diesen Drähten wird der Vibrator in dem Quarzhalter montiert. Die Befestigungsdrähte müssen von außen einwirkende Vibrationen und Stöße aufnehmen. Hierbei können an den Lötstellen große Zugbeanspruchungen auftreten. Da der punktförmige Schwingungsknoten eine Flächenausdehnung gleich Null darstellt, ist diese Befestigung ein Kompromiß zwischen genügender Festigkeit und dem Einfluß auf Schwingfrequenz und Dämpfung durch das Haltersystem.

2.10.1 Elektrische Eigenschaften von Flächenschwingern

Schnitt	DT	CT	SL
Frequenzbereich	180 ... 350 kHz	300 ... 900 kHz	350 ... 1000 kHz
Resonanzwiderstand (Normaldruck)	1000 ... 2000 Ω	500 ... 2000 Ω	
Resonanzwiderstand (Vakuum)	150 ... 400 Ω	100 ... 800 Ω	70 ... 500 Ω
dyn.Kapazität	5...50 fF	5 ... 50 fF	5 ... 50 fF
Kapazitätsverhältnis	$r = 350 \dots 450$	$r = 350 \dots 900$	$r = 350 \dots 600$
Temperaturgang	$a = 2 \dots 4 \cdot 10^{-8} / ^\circ\text{C}$	$a = 4,5 \dots 6,5 \cdot 10^{-8} / ^\circ\text{C}$	$a = 3,5 \dots 4 \cdot 10^{-8} / ^\circ\text{C}$
Umkehrpunkt	$T_0 = -10 \dots 60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$	$T_0 = 0 \dots 90^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$	$T_0 = -10 \dots 80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$

2.11 Die Temperaturabhängigkeit der Frequenz

Mit Ausnahme des AT-Schnittes, des SC-Schnittes und des GT-Schnittes haben Schwingquarze eine parabelförmige Temperaturabhängigkeit der Frequenz. Das bedeutet, daß von tiefen Temperaturen kommend, zunächst die Frequenz ansteigt, bis zu der Temperatur, die mit T_0 als Temperatur des Umkehrpunktes bezeichnet ist. Bei weiterer Erhöhung der Temperatur wird die Frequenz wieder niedriger. Dieses Frequenz-Temperaturverhalten kann mit der Gleichung einer Parabel beschrieben werden: (Bild 2.19)

$$\frac{\Delta f}{f} = -a(T - T_0)^2 \quad (14)$$

Mit Temperaturkoeffizient TK wird in der Technik eine Änderung pro Temperatureinheit definiert, in unserem Fall also relative Frequenzänderung pro Grad Celsius. Dies wäre aber die Steigung der Frequenz-Temperatur-Kurve bei einer bestimmten Temperatur; oder, mathematisch ausgedrückt, die erste Ableitung der obengenannten Beziehung. Bei der Temperatur des Wendepunktes ist also der Temperaturkoeffizient $TK = 0$. Eine Angabe des Temperaturkoeffizienten ist also in den meisten Fällen unzweckmäßig. Besser ist es, eine maximale Frequenzänderung in einem festzulegenden Temperaturbereich anzugeben.

Die Parabelöffnungskonstante a ist durch den verwendeten Quarzschnitt gegeben und unterliegt außerdem einer Streuung durch Fertigungstoleranzen der beeinflussenden Parameter. Die Temperatur des Umkehrpunktes kann durch entsprechende Wahl des Schnittwinkels in gewissen Grenzen beeinflusst werden. Auch hier sind Fertigungstoleranzen zu beachten.

Schnitt	T_0	a
X	0...45 °C	$4 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}^2$
XY	10...50 °C	$4 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}^2$
CT	0...90 °C	$5 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}^2$
DT	-10...60 °C	$2 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}^2$
SL	-10...80 °C	$4 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}^2$
NT	10...50 °C	$5 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}^2$

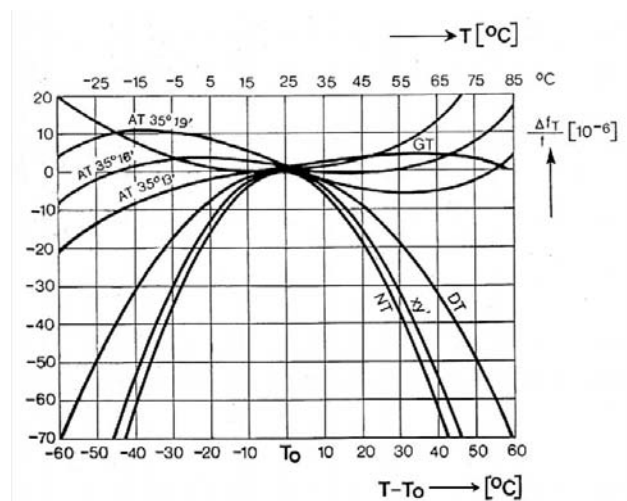


Abb. 2.19 Temperaturgang der Frequenz

2.12 Dickenschwinger

Auf Grund der Bewegungsart ist die Dickenschwinger besonders stabil gegenüber äußeren Einflüssen. Die günstigen Materialeigenschaften des Quarzes können gut genutzt werden. Deshalb werden überwiegend Schwingquarze als Dickenschwinger im Frequenzbereich 1...250 MHz verwendet. Die Resonanzfrequenz, bestimmt durch die wirksame Masse ρ und die wirksame Elastizität c_{66} wird stark vereinfacht beschrieben mit:

$$f = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{c_{66}}{\rho}} \quad (15)$$

Für den meist benutzten AT-Schnitt erhalten wir für den Grundton:

$$f_{(1)} = \frac{1660}{d} \text{ (kHz)} \quad (16)$$

d = Dicke des Resonators in mm

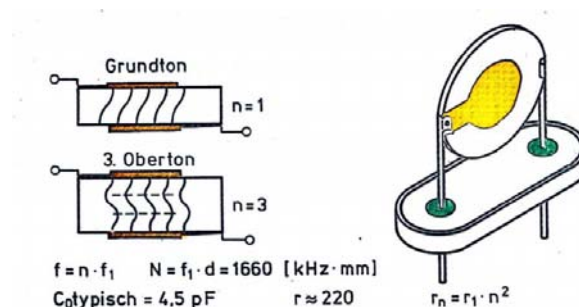


Abb. 2.20 Dickenschwinger

Die Richtung der stehenden Schallwelle der Dickenschwinger ist normal zu den beiden Oberflächen. Deshalb befindet sich der (oder bei Erregung höherer Schwingungsordnungen die) Schwingungsknoten innerhalb des Resonators, Bild 2.20. Ein Schwingungsknoten steht damit für die Halterung des Resonators nicht zur Verfügung. Bei großen Resonatoren und kleinen Anregungselektroden gelingt es, die Schwingungsenergie auf die Resonatormitte zu konzentrieren, so daß am Resonatorumfang eine dämpfungsarme Halterung ermöglicht wird. Dies ist der Fall, wenn der Durchmesser der Resonatoren größer als die 60-fache Resonatordicke und die Anregungsfläche weniger als 70 % der Resonatoroberfläche betragen. Dickenschwinger niedriger Frequenz würden damit unbequem große Abmessungen erhalten. Durch Facettieren des Resonatorumfangs oder noch

wirkungsvoller durch die Ausführung gekrümmter Resonatoroberflächen in Linsenform gelingt eine weitergehende Konzentration der Schwingungsenergie, so daß AT- Schnitt- Quarze bis herunter zur Frequenz 1 MHz im HC-6/U-Gehäuse und bis etwa 2,5 MHz im HC-49/U- Gehäuse angeboten werden können. (Abb. 2.21)

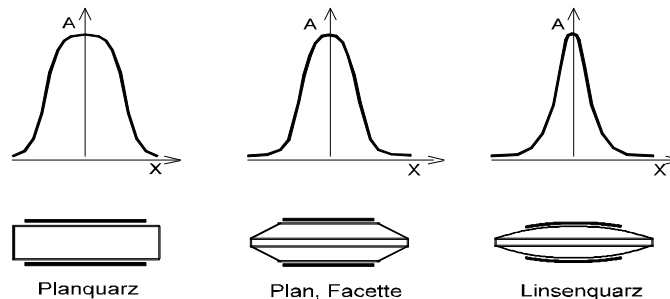


Abb.2.21 Verteilung der Schwingungsamplitude in Quarzresonatoren unterschiedlicher Form

Oberton:

Bei einer Resonatordicke bei etwa 0,08 mm liegt die Grenze der wirtschaftlichen Herstellbarkeit dünner Quarzresonatoren. Darunter wird es teuer. Bei Frequenzen über 20 MHz erregt man deshalb die mechanischen Obertöne der Dicken-scherungsschwingung. Elektrisch lassen sich nur die ungeraden Obertöne anregen, weil bei den geradzahigen Obertönen die Elektroden gleichpolig wären. Der Resonator schwingt beim n-ten Oberton in n-Ebenen (Bild 2.20). Die schwingende Masse ist im wesentlichen die gleiche wie im Grundton. Damit haben im Oberton erregte Schwingquarze etwa die gleiche dynamische Induktivität L_1 wie im Grundton. Bei der n-fachen Frequenz des n-ten Obertones beträgt dann die dynamische Kapazität $C_{1n} = C_{1g}/n^2$. Diese Tatsache, der besonders kleinen dynamischen Kapazität von Obertonquarzen wird auch bei der Konstruktion besonders stabiler Oszillatoren genutzt, indem auch bei tiefen Frequenzen Obertonquarze eingesetzt werden, z.B. 5 MHz im 5.Oberton. Schwingquarze, die für den Betrieb im Oberton bestimmt sind, werden mit feineren Oberflächen versehen oder poliert, um bei der hohen Frequenz einen genügend niederen Resonanzwiderstand zu erhalten. Trotzdem wird der Resonanzwiderstand des Obertones größer sein als der des Grundtones (theoretisch $R_n = nR_1$). Es müssen also schaltungstechnische Maßnahmen getroffen werden, damit der Schwingquarz im gewünschten Oberton erregt wird, im allgemeinen durch einen zusätzlichen Schwingkreis als Selektionsmittel*). Die Frequenzen der Obertöne liegen nicht harmonisch zum Grundton, d. h. sie sind nicht genaue Vielfache der Grundtonfrequenz. Die Abweichung kann bis zu ± 50 kHz betragen, kann aber auch übereinstimmen, insbesondere, wenn der Schwingquarz mit einer Lastkapazität gezogen wird. Dadurch, daß der Quarz im Oberton eine kleinere dynamische Kapazität C_1 besitzt, kann beim Ziehen des Quarzes eine Übereinstimmung von $nf_1 = f_n$ herbeigeführt werden. Diese Tatsache ist zu beachten, wenn die durch die Nicht-

linearitäten der Oszillatorschaltung erzeugten elektrischen Oberwellen den Phasengang des Oszillatorsignales unzulässig beeinflussen (siehe 2.15.2)

*) Mit Ausnahme von Serienresonanzschaltungen wird der Quarz kapazitiv betrieben. Der induktive Anteil des zwischen f_s und f_p betriebenen Quarzes bildet mit der kapazitiven Komponente (C_L) der Schaltung die Arbeitsfrequenz f_w . Der Kreis wird dann tiefer als die Arbeitsfrequenz abgestimmt. Für den 3. Oberton z.B. zwischen dem Oberton und dem Grundton.

2.12.1 Miniaturisierung

Es gibt mehrere Wege zur Miniaturisierung:

a) Miniaturisierung durch Nutzung von Schwingungsmoden, die für die gegebene Resonanzfrequenz kleinere Resonatorabmessungen ergeben. Meist wird hier die Längendehnungsschwingung angewendet, aber auch Biegeschwinger und Gabelschwinger werden verwendet. Diese Mikroschwinger werden meist aus dünnen, geläppten und polierten Quarzwafern durch Fotoätzverfahren herausgetrennt. Nachteilig ist der große Temperaturgang der Frequenz, der durch die Schwingungsmoden gegeben ist. Eine Miniaturisierung unter Anwendung tieffrequenter Schwingungsmoden wäre allerdings ein Anachronismus, sind wir doch heute durch die moderne Elektronik eher in der Lage hohe Frequenzen zu teilen, als umgekehrt niedere Frequenzen zu vervielfachen.

b) Miniaturisierung der Dickenscherungsschwinger:

Wie aus Bild 2.54 hervorgeht, steigt der Wert für $\tau_1 = R_1 C_1$ (Gl.32) mit kleiner werdenden Resonatorabmessungen rapide an. Da mit kleinerem Resonator auch die Elektrodenflächen kleiner werden, erhalten wir zwangsläufig kleinere C_1 -Werte. Hieraus resultiert ein erhebliches Ansteigen der Resonanzwiderstände zu kleineren Resonatorabmessungen (Bild 2.22). Bei vorgegebener Gehäusegröße und festgelegtem maxi-

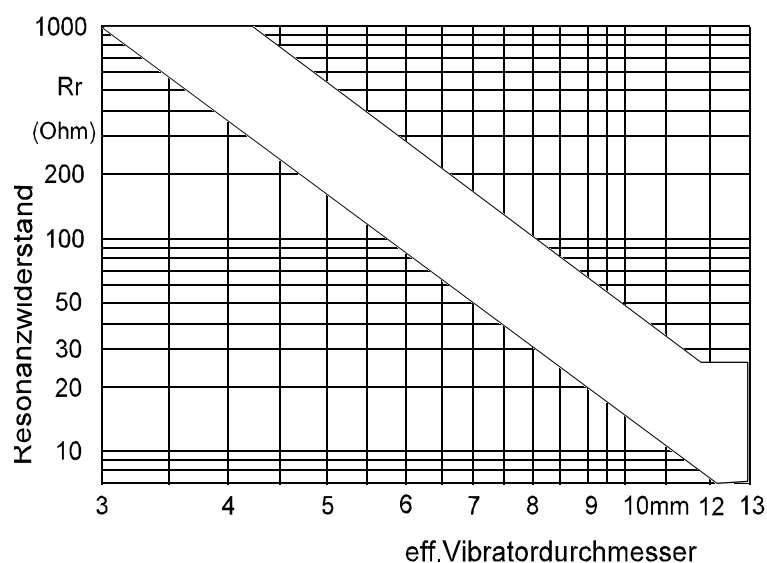


Bild 2.22 Miniaturisierung, Beispiel 4,2 MHz

malem Resonanzwiderstand ergibt sich damit eine untere Frequenzgrenze. Unter dieser Frequenzgrenze ist mit der bisher üblichen Konstruktion eine Miniaturisierung nicht möglich. Diese Frequenzgrenze liegt bei etwa 8 MHz.

Für die Miniaturisierung war also ein anderer Weg zu beschreiten. Bei der Dickenschwingung ist die stehende Welle durch die Dickenabmessung gegeben. Die Ausbreitungsrichtung dieser Welle ist beim AT-Schnitt die X-Richtung (Bild 2.23). Daher lag es nahe, zur dämpfungsarmen Halterung den Resonator stabförmig zu gestalten. Beide Überlegungen, die x- oder die z-Achse kürzer zu gestalten, haben ihre Berechtigung und sind jeweils in Abhängigkeit von der Betriebsfrequenz anzuwenden. Zur Vermeidung von Störbewegungen, die Widerstandsschwankungen im Temperaturbereich hervorrufen, sind die Abmessungen der Kantenlängen sehr sorgfältig zu dimensionieren und mit engen Toleranzen zu fertigen. Zur Verbesserung der Schwingungsgüte werden diese Resonatoren in Annäherung an die Linsenform an den Enden zugespitzt. Bei x-langen Resonatoren werden auch noch die Seitenkanten unter einem solchen Winkel abgeschrägt, daß die Verkopplung zur Scherung der Y-Fläche klein wird. Damit können auch die bekannt kleinen Temperaturgänge wie bei größeren AT-Schnitt-Quarzen erreicht werden. In der Z-Richtung ist die Stresskonstante kleiner, so daß Einflüsse der Halterung (temperaturbedingte Kräfte) auf die Frequenz kleiner sind. Mit kleiner Elektrodenfläche kann die eff. Belastung ($\text{Strom} / \text{mm}^2$) zu groß werden. Beim Betrieb von miniaturisierten Quarzen ist auf die geringere Belastbarkeit zu achten. Insbesondere, wenn vom Hersteller bereits aus Vorsicht zu hohe Resonanzwiderstände angegeben werden.

Anmerkung: Es ist z.B. bekannt, daß bei 10 MHz im Gehäuse HC-49/U, Bauhöhe 6,6 mm, die R_T -Werte bei 7...12 Ohm liegen. Ein Oszillator kann also für einen zu hochohmigen Quarz ausgelegt sein.

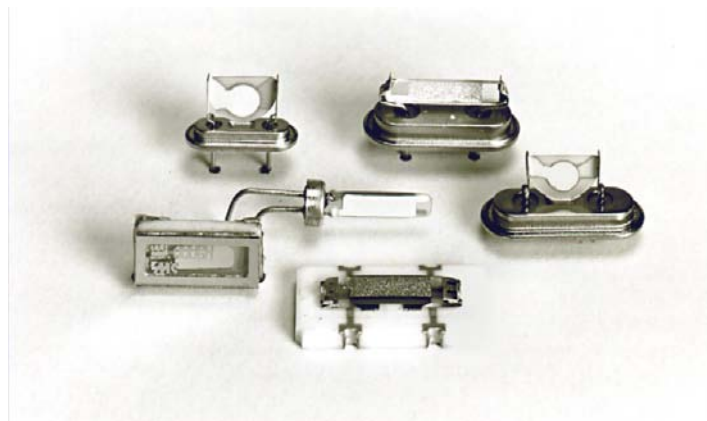


Abb. 2.25 Miniaturisierte AT-Schnitt-Schwingquarze

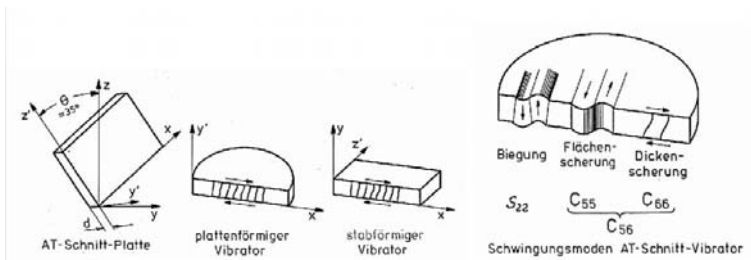


Abb. 2.23 AT-Schnitt-Quarzvibrator, Platten- und Stabform

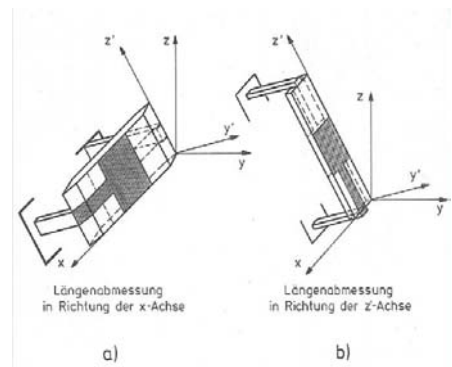
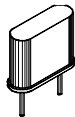






Abb. 2.24 Stabförmige AT-Schnitt-Quarzvibratoren

Elektrische Daten miniaturisierter AT-Schnitt-Quarze:

Gehäuse-Abmessungen			Anmerkung	Resonanzwiderstand bei				MHz
				4	8	12	16	
	HC-49/U	11,2x4,7x 13	1)	110	40	30	30	Ohm
		11,2x4,7x6,6	1*)	-	65	55	50	Ohm
		11,2x4,7x5,1	1*)	-	90	80	60	Ohm
	HC-52/U	8,8x3,3x8,0	1*)	250	100	55	45	Ohm
	AT-51	11,2x4,7x5,1	2)	140	100	60	50	Ohm
	MC	8,1x3,8x1,6	3)	-	100	75	50	Ohm
	Röhrchen	10,3 x 3,1Ø	2)	150	100	60	50	Ohm
		8,9 x 3,1Ø	3)	-	100	60	50	Ohm

- Die Werte in der Tabelle sind Maximalwerte nach Herstellerangaben

Anmerkungen:

- 1) konventionelle Bauart, * rund mit Abschliff
- 2) stabförmige Resonatoren
- 3) im Fotoätzverfahren hergestellte, stabförmige Resonatoren

2.12.2 Die Temperaturabhängigkeit der Serienresonanzfrequenz von AT-Schnitt-Quarzen

Die Temperaturabhängigkeit der Frequenz von Schwingquarzen hat im allgemeinen einen parabelförmigen Charakter. Eine Ausnahme sind die AT-Schnitt-Dickenschersungsschwinger, deren Temperaturabhängigkeit der Frequenz einer Gleichung dritten Grades folgt (Bild 2.26). $T_0 = 25^\circ\text{C}$

$$\frac{\Delta f}{f} = a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + c(T - T_0)^3 \quad (17)$$

Die Bezugstemperatur T_0 ist in dieser Gleichung willkürlich auf den praktischen Wert 25°C festgelegt. Die Temperatur des Wendepunktes T_w liegt bei etwa 25°C bis 35°C . Die Konstanten a , b , c sind vom Schnittwinkel θ abhängig und damit die Steigung der Kurve im Wendepunkt, ebenfalls die Maxima und Minima der Frequenz-Temperaturabhängigkeit. Durch diese charakteristischen Formen der Temperaturabhängigkeit der Frequenz ergibt sich für jeden Temperaturbereich ein anderer optimaler Schnittwinkel. Werden Quarze im Oberton betrieben, wird der Frequenzabstand der Umkehrpunkte etwa 80 ppm größer. Um dem entgegenzuwirken wird bei Quarzen, die für den Betrieb im Oberton bestimmt sind, der Schnittwinkel um etwa 7 Winkelminuten verschoben. Einen weiteren Einfluß auf den Temperaturverlauf und die Temperatur des Wendepunktes haben der Durchmesser und die Oberflächenkrümmung des Quarzelementes. Hier zum Vergleich zwei Beispiele für die Konstanten in Gl.(17):

	Planquarze	Linsenquarze
a	$(-1,32 - 0,085 \cdot \Delta\theta) \cdot 10^{-6}$	$(-1,293 - 0,08308 \cdot \Delta\theta) \cdot 10^{-6}$
b	$(0,15 - 0,093 \Delta\theta) \cdot 10^{-9}$	$(-2,889 - 0,0990 \cdot \Delta\theta) \cdot 10^{-9}$
c	$(101,3 + 0,200 \cdot \Delta\theta) \cdot 10^{-12}$	$(101,3 + 0,200 \Delta\theta) \cdot 10^{-12}$

$$\Delta\theta = \theta - 35^\circ 30'$$

Im Anhang B sind entsprechende Kurvenscharen dargestellt. Der Minimierung der Frequenzänderung in einem bestimmten Temperaturbereich sind damit physikalische Grenzen gesetzt, wobei noch herstellbedingte Streuungen der Schnittwinkel zu berücksichtigen sind.

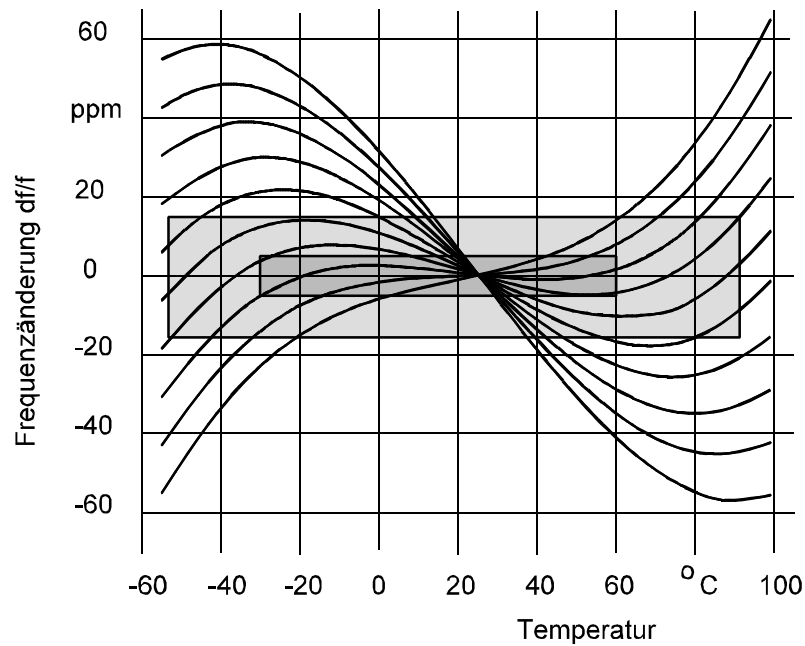


Bild 2.26 Temperaturgang der Frequenz, AT-Schnitt - Quarz (D/d=60)

Für Quarze, die in Thermostaten betrieben werden sollen, wird der Schnittwinkel so gewählt, daß die Temperatur des Umkehrpunktes mit der Thermostatterperatur übereinstimmt. Damit wird erreicht, daß aus der Restwelligkeit des Thermostaten keine Frequenzschwankungen resultieren.

Der untere Teil in Bild 2.27 stellt den Temperaturkoeffizienten $\Delta f / \Delta \vartheta$ im Abstand ϑ vom jeweiligen Umkehrpunkt dar ($\Delta f / \Delta \vartheta^2$).

Eine weitergehende Minimierung des Temperaturkoeffizienten in der Umgebung des Umkehrpunktes gelingt durch die Verwendung des SC-Schnittes. Der doppelt gedrehte SC-Schnitt ist jedoch in der Herstellung sehr aufwendig und damit entsprechend kostenträchtig.

(Anhang B).

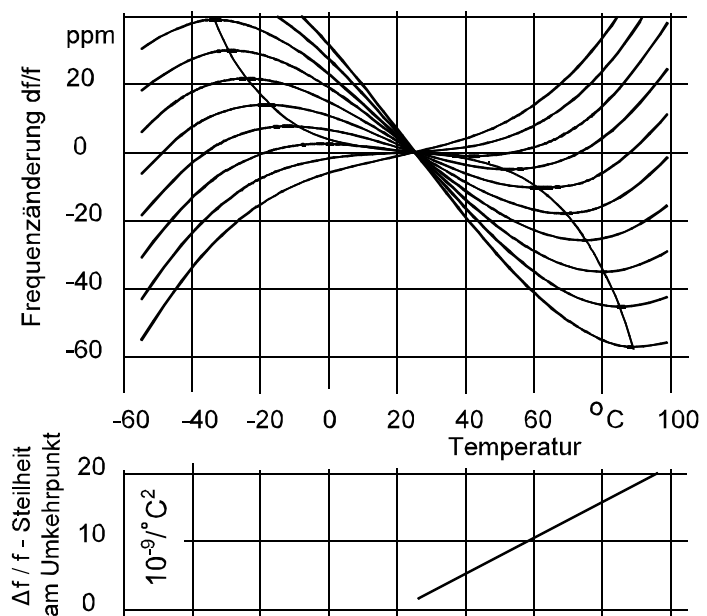


Bild 2.27 Anwendung im Thermostat, $\Delta f/f$ -Steilheit / °C²

2.12.3 Die Temperaturabhängigkeit der Lastresonanzfrequenz

Bei engtoleriertem Temperaturngung der Frequenz ist zu berücksichtigen, daß auch die dynamische Kapazität C_1 temperaturabhängig ist:

$$TK_{C_1} = \frac{\Delta C_1}{C_1} \frac{1}{\Delta T} \approx 275 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (18)$$

Bei Betrieb des Schwingquarzes mit einer Lastkapazität C_L wird damit auch der Ziehbetrag temperaturabhängig:

$$\delta \left(\frac{\Delta f}{f} \right)_T = \frac{TK_{C_1} C_1}{2(C_0 + C_L)} \Delta T \quad (19)$$

Diese, nur bei Quarzen mit großem C_1 relevante Temperaturabhängigkeit des Ziehbetrages, ist zu der Temperaturabhängigkeit der Serienresonanzfrequenz zu addieren (Bild 2.28). Wir erhalten damit die Temperaturabhängigkeit der Lastresonanzfrequenz.

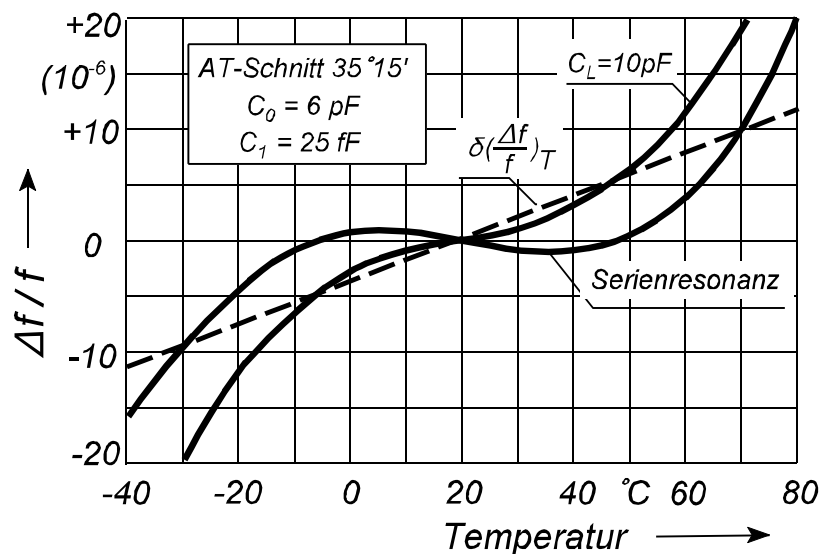


Bild 2.28 Frequenz-Temperaturabhängigkeit mit Lastkapazität

2.12.4 Die Hysterese des Temperaturganges

Bild 2.29 A:

Eine Hysterese der Temperaturabhängigkeit wird immer auftreten, wenn die Temperaturänderung sehr schnell erfolgt. Der Quarzresonator wird erst nach einer gewissen Zeit die Temperatur des Quarzgehäuses annehmen. Dies trifft im besonderen Maße für Quarze mit evakuierten Gehäusen zu.

Ab wann eine Temperaturänderung zu schnell ist, hängt von der Wärmeleitung der Halterung und der Masse des Quarzresonators ab. Niedere Quarzfrequenz = dickerer Resonator bedeutet größere Wärmeträgheit.

Bild 2.29 B:

Eine andere Ursache für eine Hysterese des Temperaturverlaufs sind mechanische Spannungen durch Temperaturgradienten im Resonator. Diese werden durch ungleichmäßige Erwärmung des Resonators hervorgerufen. Die Konstruktion von Thermostaten muß einen gleichmäßigen, symmetrischen Wärmefluß zum Schwingquarz gewährleisten. Die elek-

trischen Verbindungen zu den Quarzanschlüssen müssen schlecht wärmeleitend sein, damit über die Anschlüsse und die Halterung zum Quarzresonator kein Wärmefluß stattfinden kann. Temperaturgradienten führen zum Überschwingen der Frequenz bereits bei geringen Temperaturschwankungen. Das Überschwingen kann erheblich größer sein, als die statische Temperaturabhängigkeit.

Bild 2.29 C:

Eine in eine Richtung laufende Hysterese kann ihre Ursache in mechanischen Restspannungen des Halterungssystems haben. Durch Temperaturzyklen wird das System getempert. Nach einigen Zyklen wird diese Hysterese kleiner. Nach mechanischen Beanspruchungen des Schwingquarzes, zum Beispiel durch Stoß oder unzulässigen Beschleunigungen ist mit der Hysterese Typ C zu rechnen.

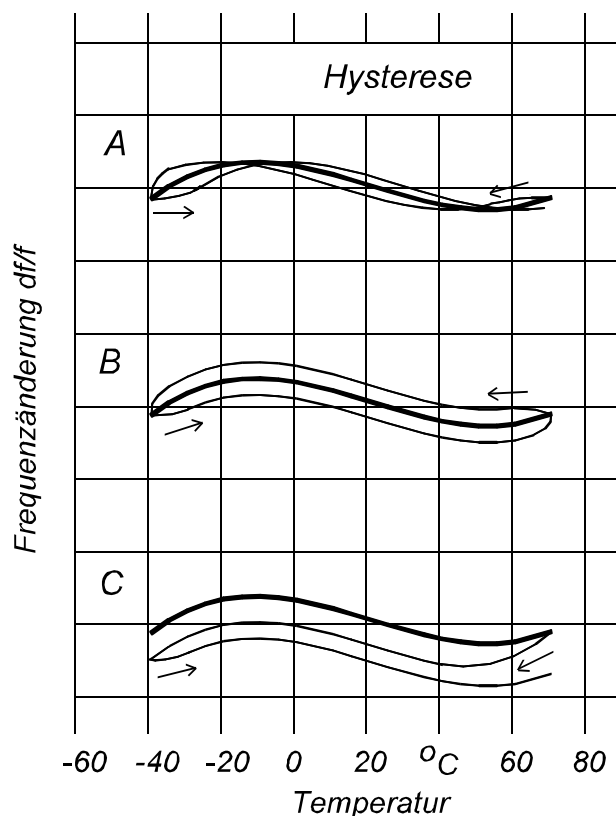


Bild 2.29 Hysterese

2.12.5 Der Temperaturgang in der Schaltung

Die bisher beschriebenen Temperaturabhängigkeiten der Frequenz waren die des Schwingquarzes, ohne den Einfluß der Temperaturgänge von Bauelementen der Oszillatorschaltung. Das Bild 2.30 zeigt den Temperaturgang eines spannungsgesteuerten Oszillators (VCXO) bei verschiedenen Steuerspannungen U_z (Ziehspannungen). Die Kapazitätsdiode hat bei großer Sperrspannung gerade einen, dem Lastkapazitätswert entgegenwirkenden Effekt, bei kleiner werdender Ziehspannung nimmt der Einfluß immer größere negative Werte an. Die angewendete Serienspule ist an dem Temperaturgang mit $-0.2\text{ppm}/^\circ\text{C}$ beteiligt. Die Größenordnung und Richtung sind von den eingesetzten Bauelementen und der Schaltung abhängig, so daß keine allgemeingültigen Hinweise gegeben werden können.

Vor der Bestellung von Quarzen für die Produktion, sollte man mit Quarzen

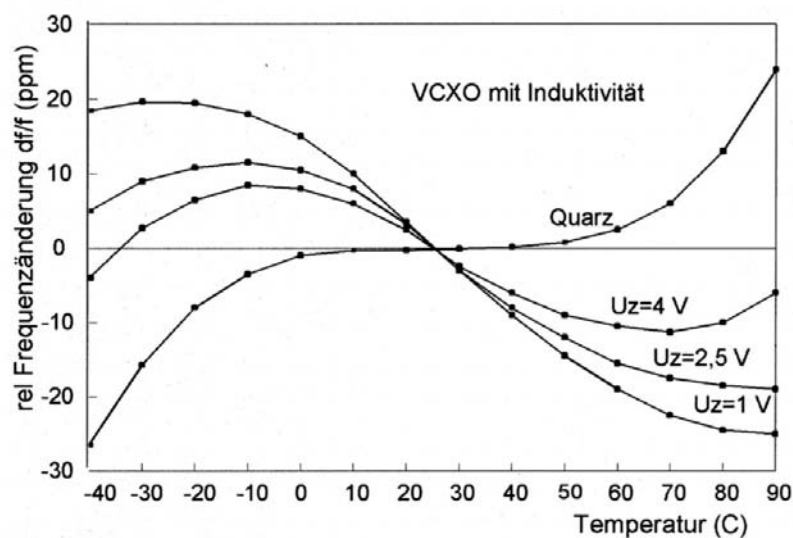


Abb. 2.30 Temperaturgang mit Oszillator

bekannten Temperaturganges die Schaltung untersuchen, damit Schaltungseinflüsse durch Schnittwinkelkorrekturen beim Quarz berücksichtigt werden können.

2.12.6 Die Temperaturabhängigkeit des Resonanzwiderstandes

Der Temperaturgang des Verlustwiderstandes des idealisierten Schwingquarzes ist im Temperaturbereich von -60°C bis 120°C vernachlässigbar klein. Bei Längendehnungs- und Flächenscherungsschwingern kann durch die Einflüsse der Kontaktierung der Resonanzwiderstand mit zunehmender Temperatur ansteigen. Der Anstieg kann bis zu $1\text{ }^\circ\text{C}$ betragen. Die Eigenschwingung, der im Schwingquarzgehäuse eingeschlossenen Gassäule, kann im Resonanzfall zu einem Anstieg des Resonanzwiderstandes des Quarzes bei bestimmten Temperaturen führen. Bei Dickenschwinger (1 .. 250 Mhz), können insbesondere bei Typen tieferer

Frequenz über den Temperaturbereich Widerstandserhöhungen (Dip's) auftreten. Diese Dip's entstehen durch Verkoppelungen mit Störresonanzen, sie sind nicht immer zu vermeiden, sollten aber die in der Spezifikation festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten. Mit diesen Dip's ist im allgemeinen ein Frequenzsprung verbunden (Bild 2.31). Mit zunehmendem Quarzstrom (Quarzbelastung) können diese Dip's größere Werte annehmen als bei kleiner Belastung. Bei miniaturisierten Quarzen treten diese Dips schon bei geringeren Belastungen auf. Durch die Regeleigenschaften der meisten Oszillatoren wirken sie sich jedoch in der Praxis nicht aus, wenn die Quarzbelastung genügend klein ist. Auch Betauung des Quarzresonators durch im Quarzgehäuse eingeschlossene Dämpfe (z.B. Wasserdampf durch undichte Gehäuse) führen zum Widerstandsanstieg bei Erwärmung der Quarze über die Taupunkttemperatur. (Tritt nur bei raschem Temperaturwechsel in der Richtung von kalt nach warm auf).

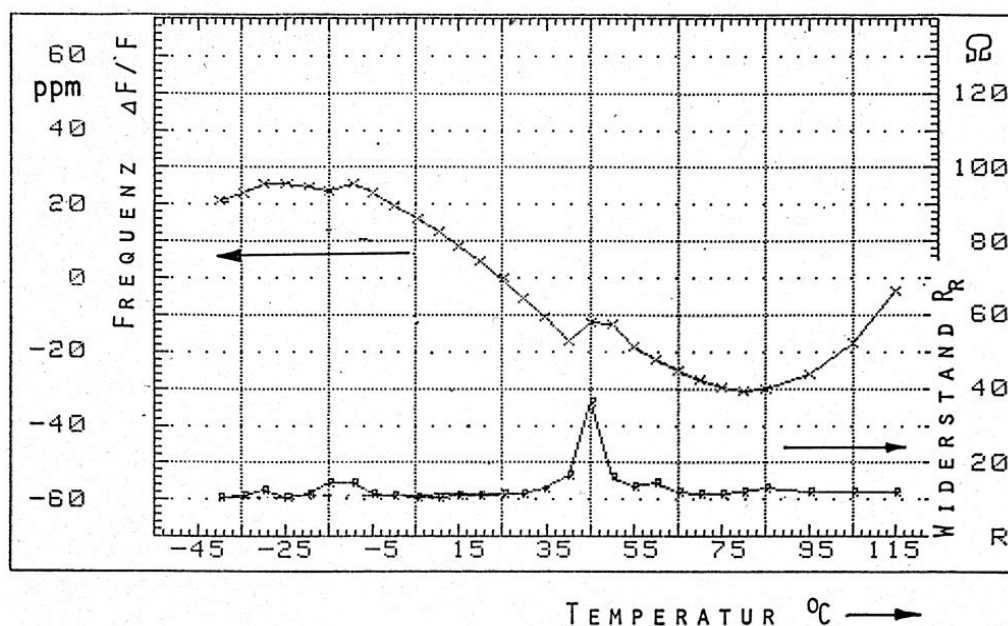


Abb. 2.31 Dip im Temperaturbereich

2.12.7 Temperatursensoren

Zur Messung von Temperaturen kann die Temperaturabhängigkeit der Frequenz von Schwingquarzen genutzt werden. Dies scheint immer dann sinnvoll, wenn das Meßergebnis digital weiterverarbeitet werden soll. Üblicherweise wird die stark temperaturabhängige Frequenz des Sensorquarzes mit der Frequenz eines temperaturstabilen Referenzquarzes in einem Mischer verglichen. Das Ausgangssignal des Mixers kann in einfachen Fällen direkt zum Anzeigen der Temperatur genutzt oder weiterverarbeitet werden. Eine derartig einfache Anordnung ist im Prinzip in Bild 2.32 dargestellt. Für hohe Anforderungen an die Linearität kann die Kennlinienkrümmung mit einem Rechner leicht korrigiert werden. Die Abweichung von der Linearität ist aus der Gl.(17) abzuleiten. Die Koeffizienten a , b , c sind leicht zu ermitteln.

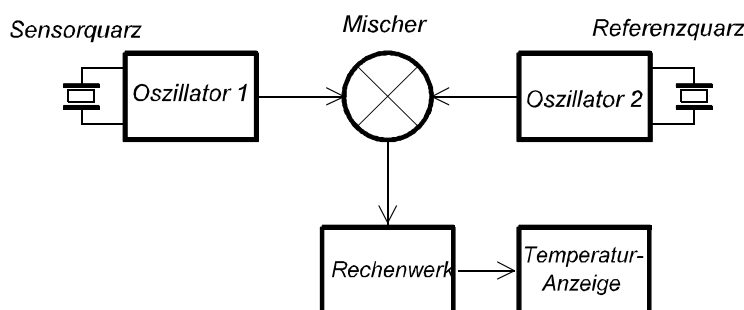


Bild 2.32 Präzisionstemperaturmessung,
Prinzipschaltbild

An einen Sensorquarz zur Temperaturmessung werden bestimmte Anforderungen gestellt:

- großer Temperaturgang der Frequenz
- Temperaturgang möglichst linear, keine Diskontinuitäten im Temperaturgang
- hohe Langzeitkonstanz
- geringe Wärmeträgheit
- Eignung für großen Temperaturbereich

Diese Bedingungen werden am besten von Dickenschersungsschwingern erfüllt. Für Temperatursensoren werden die Schnittwinkel so gewählt, daß anders als beim AT-Schnitt, der Temperaturkoeffizient groß wird. Die Abhängigkeit des Temperaturkoeffizienten für die Temperatur 25°C vom Schnittwinkel ist in Bild 2.33 dargestellt.

Für Temperatursensoren gebräuchliche Schnitte sind der AC-Schnitt, Y+5°- Schnitt und der LC-Schnitt. Der AC-Schnitt (Copplung = 0) mit dem Schnittwinkel 31,3° ist besonders frei von Unstetigkeiten im Temperaturgang der Frequenz, weil der Kopplungsfaktor s_{56} zur störenden Flächenschierung Null wird. Er ist damit frei von

Diskontinuitäten im Temperaturbereich. Der Temperaturgang liegt bei etwa 25 ppm/°C, ist allerdings nicht ganz linear, d.h. der Temperaturkoeffizient ist über den Temperaturbereich nicht ganz konstant. Der Y+5°-Schnitt hat den größten positiven Temperaturkoeffizienten der Y-Schnitt-Dickenscherschwinger. Die kubische Komponente in Gl.(17) ist bei diesem Schnitt sehr klein, so daß hier eine brauchbare Linearität des Temperaturkoeffizienten mit etwa 95 ppm/°C erreicht wird. Dadurch, daß die Abhängigkeit des Temperaturkoeffizienten vom Schnittwinkel im Maximum liegt, kann die Streuung des Temperaturkoeffizienten innerhalb enger Grenzen eingehalten werden.

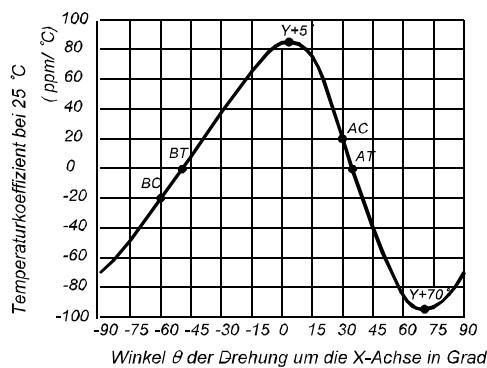


Bild 2.33 Temperaturkoeffizient von Y-Schnitten

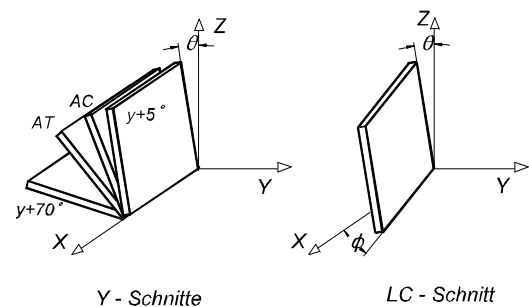


Bild 2.34 Schnitte für Temperatursensor - Quarze

Der Y+5°-Schnitt ist deshalb der für Temperaturmessungen am häufigsten angewendete Schnitt. Ähnliche Verhältnisse finden wir bei dem Schnittwinkel um Y+70°, dem Extremwert der TK-Schnittwinkel-Abhängigkeit. Der

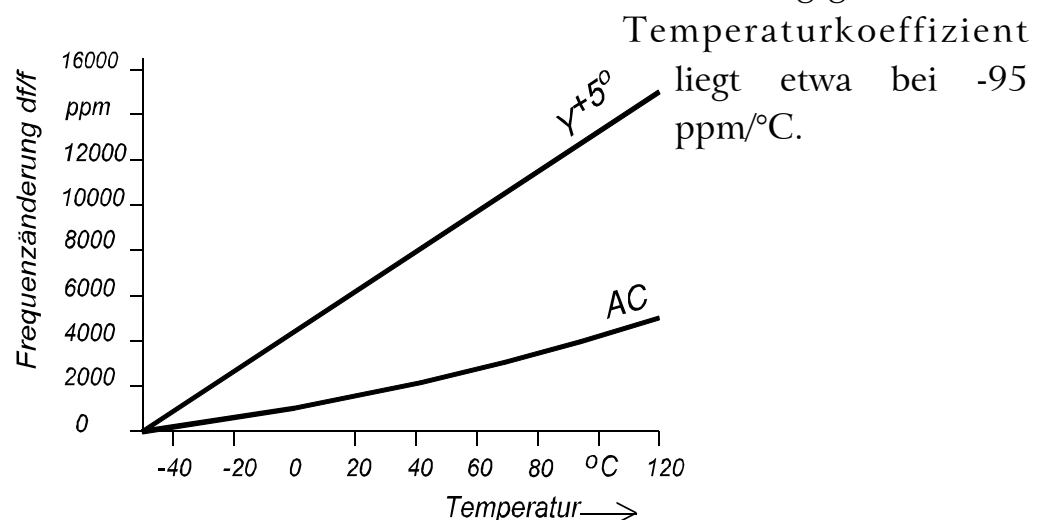


Bild 2.35 Temperaturmeßquarze, Temperaturgang

Schnitt	1.Drehung θ	2.Drehung ϕ	Tk (ppm/°C)
y+5°	5°	0	+85
AC	31,5°	0	+25
AT	35,5°	0	0
y+70°	70°	0	-95
LC	9°	11°	+35

Der LC-Schnitt (**L**inear-**C**oeffizient) ist ein in der Herstellung sehr anspruchsvoller Schnitt, weil er gegen zwei kristallographische Achsen gedreht ist. Er ist gegen die Z-Achse um etwa 9° und gegen die X-Achse um etwa 11° gedreht. Damit erreicht man eine außerordentlich gute, im Vergleich zu den anderen Sensorschnitten um den Faktor 10 bessere Linearität. Der Temperaturkoeffizient beträgt etwa 35 ppm/°C. Durch die zweifache Drehung des Schnittes wird die Herstellung sehr teuer. Heute ist es jedoch kein Problem, die Restkennlinienkrümmung elektronisch auszugleichen. Dadurch hat der LC-Schnitt an Bedeutung verloren.

2.12.8 Belastungsabhängigkeit, Großleistungsverhalten

Die Amplitude der mechanischen Schwingung von Schwingquarzen ist proportional der Amplitude des Wechselstromes, der durch den Verlustwiderstand R_l (Resonanzwiderstand) fließt. Eine unzulässige Erhöhung des Stromes führt zur Zerstörung des Quarzresonators durch Überschreiten der Materialfestigkeit des Quarzkristalles. Vor Erreichen dieser Festigkeitsgrenze ändern sich die elastischen Eigenschaften des Quarzmaterials, wodurch eine Änderung der Resonanzfrequenz erfolgt. Bleibende Veränderungen können durch entstehende Versetzungen im Kristallgitter hervorgerufen werden. Durch die Verlustleistung $P_C = I^2 R_l$ erfolgt außerdem eine örtliche Erwärmung im Quarzresonator, die ebenfalls zu einer Frequenzänderung führt. Größe und Richtung dieser Frequenzänderung sind von Quarzstrom, Resonanzwiderstand, Frequenz, Resonatorabmessungen, Schnittwinkel und Herstellverfahren abhängig, so daß keine allgemeingültigen Angaben über die Lastabhängigkeit gemacht werden können. Die in Bild 2.36 dargestellten Lastabhängigkeiten können deshalb nur als typische Verläufe angesehen werden. Bei

starker Belastung der Schwingquarze können sich irreversible Frequenzänderungen ergeben, oder auch Frequenzänderungen, die erst nach längerer Zeit wieder abklingen (Alterung).

Quarzresonatoren mit kleinen Oberflächen oder mit kleinen Elektroden, sind nicht so hoch belastbar, wie größere Quarze. Quarze mit großer Güte Q sind ebenfalls nicht so hoch belastbar. Schon unter der Belastungsgrenze können belastungsabhängige Widerstandseinbrüche im Temperaturbereich (Dip's) auftreten (siehe 2.12.6). Durch die Regeleigenschaften der meisten Oszillatoren stören diese belastungsabhängigen Dip's nicht, solange sie die Amplitudenregelung im Oszillator nicht überfordern. Vor Festlegung in der Spezifikation, sind die Grenzen für Resonanzwiderstand und Belastung im Oszillator zu ermitteln.

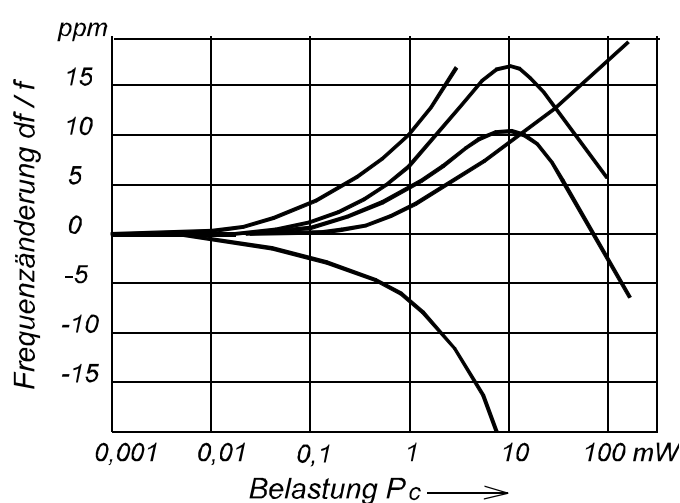


Bild 2.36 Grobbleistungsverhalten von Schwingquarzen

2.12.9 Kleinleistungsverhalten (DLD = Drive level dependence)

Im Bereich sehr kleiner Belastungen kann der Resonanzwiderstand von Schwingquarzen höhere Werte annehmen. Derartige Widerstandserhöhungen werden durch oberflächige Partialschwingungen hervorgerufen, z.B. lose Elektroden, elastisch angekoppelte Partikel im Größenbereich $0,5\mu$ bis 2μ und kontaminative hochviskose Medien. Der Widerstand kann zu kleinen Leistungen hin ansteigen, aber auch bei bestimmten Leistungen einen Maximalwert erreichen (Bild 2.37). Diese Erhöhung des Resonanzwiderstandes bei kleiner Leistung kann zu Anschwingproblemen, besonders bei Oszillatoren mit geringer Anschwingsteilheit führen. Die Hersteller von Schwingquarzen treffen Vorkehrungen, daß der Resonanzwiderstand der Schwingquarze über einen weiten Belastungsbereich möglichst konstant bleibt. Ein richtig dimensionierter Quarzoszillator schwingt noch sicher mit einem Quarz an, der einen dreifachen Resonanzwiderstand aufweist, als spezifiziert ist.

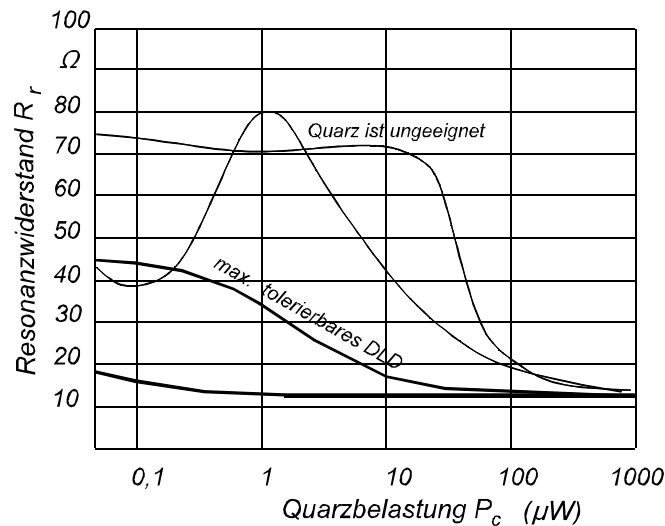


Bild 2.37 Kleinleistungsverhalten (DLD)

Der beschriebene Widerstandsanstieg verschwindet nach dem Betrieb mit erhöhter Belastung, kehrt aber nach längerer Zeit (2-4 Wochen) wieder zurück. Nur mit sehr großen Schwingamplituden, die eine sehr große Überlastung bis an die Bruchgrenze des kristallinen Gefüges bedeuten, ist zum Teil die Lastabhängigkeit auf Dauer regenerierbar. Erhebliche Frequenzänderungen gehen mit diesem Verfahren einher, deshalb ist es kein Verfahren für den Anwender von Schwingquarzen. Ursachen für einen Widerstandsanstieg bei bestimmten Leistungen sind auch Verletzungen der Oberflächen der Quarzresonatoren und Spratzer vom Aufdampfen der Elektroden. Diese Änderungen des Resonanzwiderstandes mit der Belastung sind irreversibel, also nicht ausheilbar. Bild 2.38 zeigt ein solches Verhalten in einer anderen Darstellung, die man erhält, wenn in einer π -Glieder-Schaltung der Resonanzwiderstand über die Frequenz in dem sehr engen Bereich der Resonanz mit einem Netzwerkanalysator "durchgewobbelt" wird. Die Belastung ist Parameter. An dem Beispiel ist erkennbar, daß der Widerstandsanstieg nur in einem sehr engen Bereich der Belastung auftritt. Diese Eigenschaft von Schwingquarzen entzieht sich rationeller Prüfverfahren. Schon deshalb muß der Oszillator eine genügende Anschwingsicherheit haben.

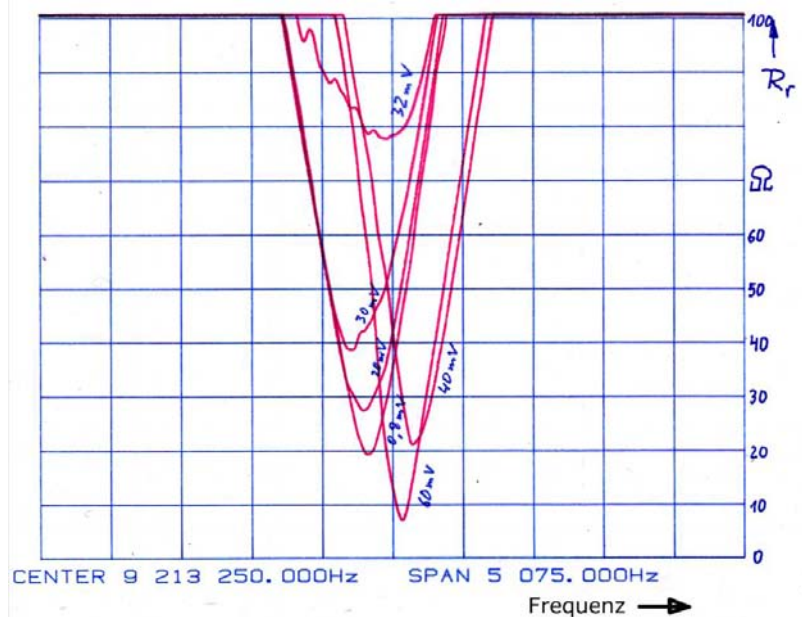


Abb. 2.38 Belastungsabhängigkeit des Resonanzwiderstandes

2.12.10 Nebenresonanzen

Aus der vollständigeren Gleichung für die Eigenresonanzen der Dickenschersungsschwingung

$$f_{n,m,p} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho}} \sqrt{\frac{\epsilon_{66} n^2}{d^2} + \frac{\epsilon_{11} m^2}{l_x^2} + \frac{\epsilon_{55} p^2}{l_y^2}} \quad (20)$$

erkennen wir, daß der Hauptresonanz zu höheren Frequenzen hin eine Reihe von unharmonischen Scherungsschwingungen, die Nebenresonanzen, folgen (Bild 2.40). Es sind dies die antimetrische Dickenschersung und die Dickentwistschwingung verschiedener Ordnungen, die der Hauptresonanz des Grundtones ($n=1$) oder des Obertones ($n=3;5;7\dots$) folgen (Bild 2.39).

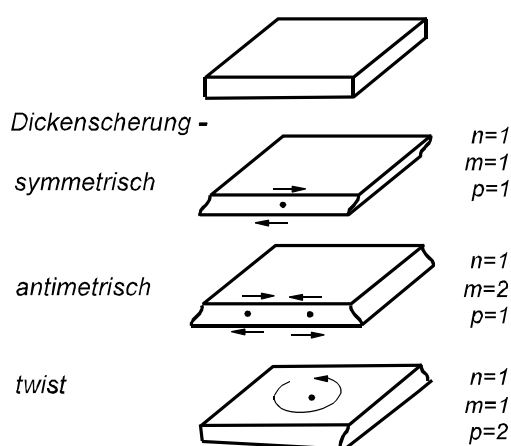


Bild 2.39 Dickenschersung, Nebenresonanzen

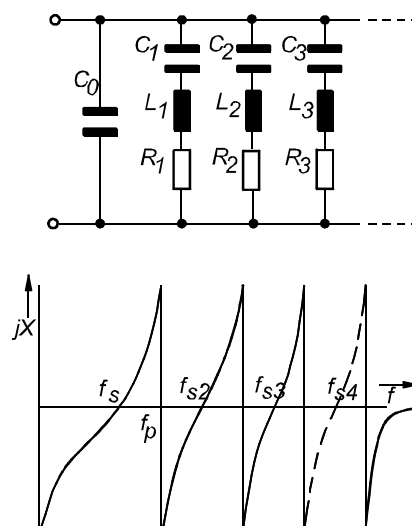


Bild 2.40 Ersatzschaltbild, Quarz mit Nebenresonanzen

Bei kleinen Elektrodendurchmessern und sehr dünner Plattierung (Energy-Trapping-Prinzip) können die Nebenresonanzen weitgehend unterdrückt werden. Die Resonanzwiderstände werden dann allerdings etwas hochohmiger. Deshalb wird diese Technik nur für Filterquarze angewendet.

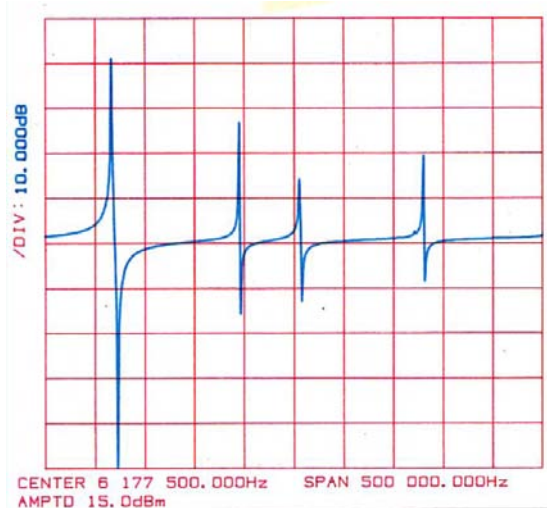


Abb. 2.41 Nebenresonanzspektrum

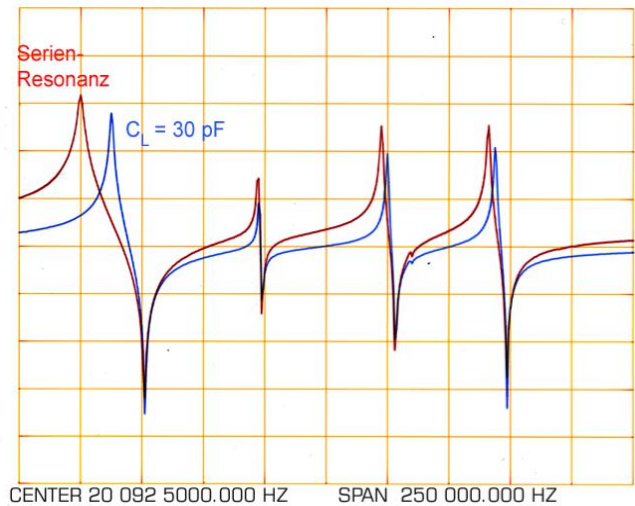


Abb. 2.42 Nebenresonanzen, Ziehverhalten - dyn.Kapazität

Bei Oszillatoranwendungen ist bei richtiger Auslegung der Oszillatorschaltung eine Unterdrückung der Nebenresonanzen um 3 dB ausreichend (Bild 2.41). Dadurch, daß die dynamische Induktivität der Nebenresonanz größer ist als die der Hauptwelle, ist die Anschwingzeitkonstante der Nebenresonanz gegenüber der Hauptresonanz größer. Der Oszillator wird also zuerst mit der Hauptwelle anschwingen, um dann in die Begrenzung zu gehen, dadurch wird nun ein Oszillieren mit der Nebenresonanz unterdrückt. Am Ziehverhalten der Nebenresonanzen ist leicht zu erkennen, daß die dynamische Kapazität der Nebenresonanzen kleiner ist. In Bild 2.42 ist die Frequenzänderung für eine Lastkapazität $C_L = 30 \text{ pF}$ dargestellt. Die Einschwingzeit eines Oszillators bis zum Erreichen von 99% der Amplitude beschreibt die Gleichung mit t in ms, L_1 in mH, k = Amplitudenfaktor, R_N = neg. Widerstand der Oszillatorschaltung, R_1 in Ω .

$$t \approx \frac{2 L_1 \ln k}{|R_N| - R_1} \quad (21)$$

2.12.11 Die Alterung

Unter Alterung versteht man bei Schwingquarzen die Abhängigkeit der Eigenschaften von der Zeit, insbesondere die der Resonanzfrequenz. Mit Alterung ist nicht die Kurzzeitstabilität gemeint, die eine statistische Frequenzänderung in Zeitintervallen von Bruchteilen einer Sekunde darstellt. Die langzeitbedingte Frequenzdrift (Alterung) von Schwingquarzen wird durch mehrere Ursachen bewirkt:

Materialbedingte Alterung:

Langzeitliche Veränderungen der Eigenschaften und der Struktur des Quarzkristalles, die auf die Eigenfrequenz des Schwingquarzes einen Einfluß haben. Es sind dies Versetzungen im Kristallgitter, die Wanderung von eingebauten Fremdatomen (Verunreinigungen), mechanische Spannungen, die bei synthetischen Rohquarzen durch zu schnelles Züchten auftreten.

Konstruktionsbedingte Alterung:

Schwingquarze, die für hohe mechanische Beanspruchungen konstruiert sind, erfordern eine sehr starre Halterung der Quarzscheibe im Schwingquarzgehäuse. Diese starre Halterung übt mechanische Kräfte auf den Resonator aus. Hieraus resultierende Frequenzänderungen müssen in Kauf genommen werden. Bei hohen Anforderungen an die Frequenzkonstanz wird die Halterung so konstruiert, daß sie möglichst keinen Einfluß auf die Frequenz des Schwingquarzes hat. Diese Quarze sind dann jedoch recht empfindlich gegenüber äußeren mechanischen Belastungen. Für normale Anwendungen wird ein Kompromiß zwischen den beiden Extremen gesucht. Wichtig ist ein hermetischer Verschluß des Schwingquarzgehäuses, um das Eindringen von Gasen und Dämpfen aus der umgebenden Atmosphäre zu verhindern. Durch Wasserdampfdiffusion in das Kristallgitter entsteht zum Beispiel eine negative Frequenzdrift von ca. $\Delta f/f = 10^{-8} \dots 10^{-9}/h$. Einen ähnlichen Einfluß haben Oxidationen oder korrosive Fremdgase. Kunststoffe sind wasserdampfdurchlässig. Deshalb kommen für Schwingquarzgehäuse nur hermetisch verschlossene Metallgehäuse, Keramik- oder Glasgehäuse in Frage.

Herstellungsbedingte Alterung:

Durch den Herstellprozeß bedingt und beeinflußt, werden Frequenzänderungen initiiert. Die Rückbildung dieser Einflüsse wirken sich als Alterung mit relativ kurzer und beeinflubarer Zeitkonstante aus. Hier seien genannt: Störungen des Kristallgitters durch die mechanische Bearbeitung (Schleifen, Polieren). Rekristallisation des Elektrodenmaterials und die Diffusion des Elektrodenmaterials in das Kristallgitter. Verspannungen des Quarzresonators durch das Halterungssystem und die Befestigung des Resonators (Leitkleber) in der Halterung.

Die herstellungsbedingte Alterung kann zum Teil durch Optimierung der Prozesse minimiert werden und die Beruhigungsphase durch Stabilisierungsmaßnahmen verkürzt werden. Die Einleitung und der weitgehende Abschluß dieser Stabilisierungen gehören bei professionellen Schwingquarzen zum Fertigungsprozeß. Bei preisgünstigen Quarzen aus Großserienfertigungen ist diese Stabilisierung nicht immer abgeschlossen. Die Alterung ist ein Stabilisierungsprozeß, an dem alle genannten Einflußgrößen mehr oder weniger stark beteiligt sind. Einige Einflußgrößen werden ihren Gleichgewichts-

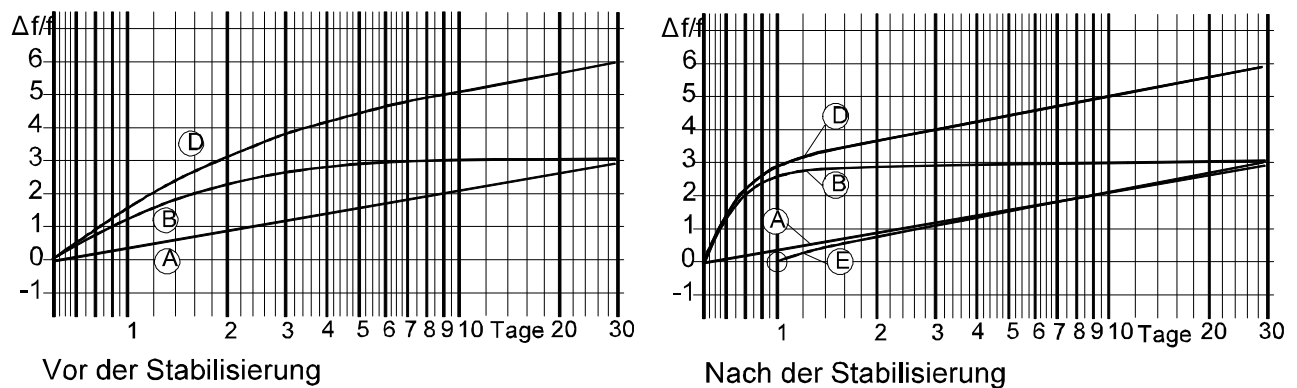


Bild 2.43 Stabilisierung der Frequenzunstabilität

zustand nach relativ kurzer Zeit erreichen, andere erst nach langer Zeit. Äußere Einflüsse, Stoß, Vibration, Temperaturschock, elektrische Überlastung können den Stabilisierungsprozeß stören oder einen neuen Alterungsablauf einleiten ("Wiedereinlauf"). Die durch den Fertigungsprozeß bedingten Einflüsse klingen meist in sehr kurzer Zeit (ein bis zwei Tage) auf vernachlässigbare Restfehler ab. Diese Einflußgrößen können unterschiedliche Richtungen der Frequenzänderung zur Folge haben (Bild 2.44).

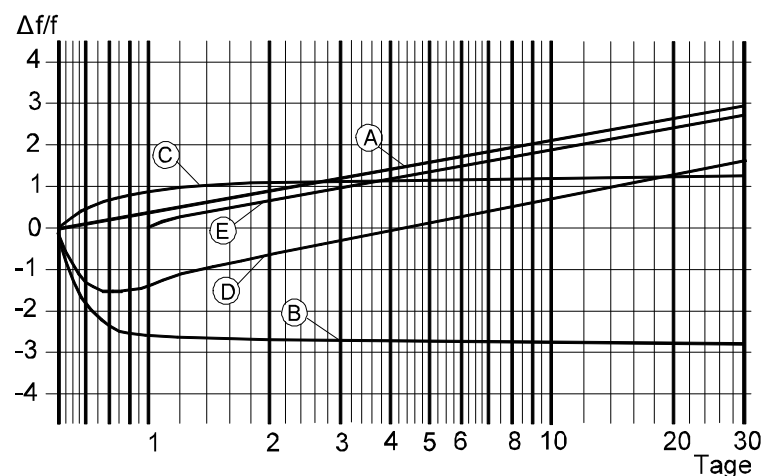


Bild 2.44 Alterung, Einflußgrößen

Einflußgrößen auf die Alterung (Bild 2.44):

- A) Die “natürliche” Alterung, die Alterung im eingelaufenen Zustand.
- B) Eine Komponente mit negativer Frequenzänderung, z.B. eine Stresskomponente hatte eine Frequenzänderung in positiver Richtung zur Folge. Durch das Ausgleichen der Spannungen kehrt nun die Frequenz zu ihrem niederen Ausgangswert zurück.
- C) Eine Komponente positiver Frequenzänderung.
- D) Die Summe aller Frequenzänderungen.
- E) Die Summe aller Frequenzänderungen bezogen auf den Meßwert nach dem ersten Meßtag.

Durch Temperieren kann der Einlaufprozeß beschleunigt werden. Die Alterung A) wird dabei nicht beeinflusst. Für die Beseitigung von Stress kann ein Temperaturwechsel vorteilhaft sein. Dieser Einlaufprozeß gehört nicht zur Alterung. Der Einlaufprozeß sollte vor dem Beginn der Alterung, bzw. vor der Anwendung der Schwingquarze abgeschlossen sein. Die nach der Stabilisierung verbliebene, manchmal mit natürlicher Alterung bezeichnete zeitliche Frequenzänderung ist die Alterung. Im praktischen Betrieb werden jedoch immer wieder in kleinem Maße mechanische Spannungen erzeugt, die zu einem erneuten Wiedereinlaufen führen. Siehe hierzu 2.12.12 Wiedereinlauf der Frequenz.

Die Größe der Frequenzänderung kann bei Großserienquarzen, in Bereichen von $\Delta f/f \sim 10^{-6}$ liegen. Bei Präzisionsquarzen liegt die Alterung in Bereichen von $\Delta f/f \sim 10^{-9}$. Obertonquarze haben eine kleinere Alterung, weil die Oberfläche des Resonators im Vergleich zu seinem Volumen günstiger ist, gegenüber Grundtonquarzen gleicher Frequenz. Deshalb werden für Präzisionsanwendungen Obertonquarze verwendet. Die Alterung im eingelaufenen Zustand, die Langzeitalterung, kann mit guter Näherung mit der Gleichung (22) beschrieben werden:

$$\frac{\Delta f}{f} = k \ln \frac{t}{t_0} \quad (22)$$

Wenn die Alterung jeweils auf den Meßwert des ersten Tages bezogen wird, kann die Gleichung vereinfacht werden:

$$\frac{\Delta f}{f} = k \ln t \quad (23)$$

Im Bereich der Gültigkeit der Gesetzmäßigkeit nach Arrhenius können wir einführen:

$$k = K_0 e^{-\frac{E}{RT}} \quad (24)$$

Damit erhalten wir für Schwingquarze die Alterung in Abhängigkeit von der Temperatur:

$$\frac{\Delta f}{f} = K_0 e^{-\frac{E}{RT}} \ln t = K_0 K_T \ln t \quad (25)$$

mit T = Temperatur in K. Die Aktivierungsenergie E ist für jeden Quarztyp jeweils zu ermitteln. Die Tabelle ist mit E/R = 1018 errechnet worden.

Quarztyp	K ₀	$\Delta f/f$; 1 Jahr; 25°C max (praktische Werte)
Präzision, 3.Obt.	bis $0,1 \cdot 10^{-6}$	$0,02 \cdot 10^{-6}$
HC-6/U (Prof.)	bis $2 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$
HC-18/U (Cons.)	bis $7 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
AT-Stab-Quarz	bis $10 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$

Die Zunahme der Alterung beträgt unter der Annahme von E/R=1018 etwa 10% pro 10°C. Für überschlägige Rechnungen kann angenommen werden, daß eine Alterung über 30 Tage bei 85°C einer Frequenzänderung über ein Jahr bei 25°C entspricht. Der nach DIN 45103 genormte Alterungstest sieht eine Lagerung der Schwingquarze bei der Temperatur von 85°C über einen Zeitraum von 30 Tagen vor. Die Differenz aus den Frequenzmessungen nach dem dreißigsten Tag und dem ersten Tag nennen wir dann die Alterung A (vorausgesetzt, die Quarze waren eingelaufen).

$$K_0 = 5,0503 A \quad (26)$$

Durch den logarithmischen Verlauf der Alterung sind Angaben wie "Alterung kleiner als 0,1 ppm/Tag" unsinnig, es sei denn, es wird angegeben, wann dieser Tag stattfinden soll, etwa bei Auslieferung der Quarze oder nach einer Einlaufzeit von 6 Monaten. Besser ist es, Werte anzugeben, die unter den Meßbedingungen nach DIN 45103 ermittelt wurden. Unter diesen Bedingungen gemessene Alterungswerte von 0,5 bis 2ppm sind bei Quarzen aus einer Serienfertigung üblich. Bei Präzisionsquarzen werden Werte von 10^{-9} erreicht.

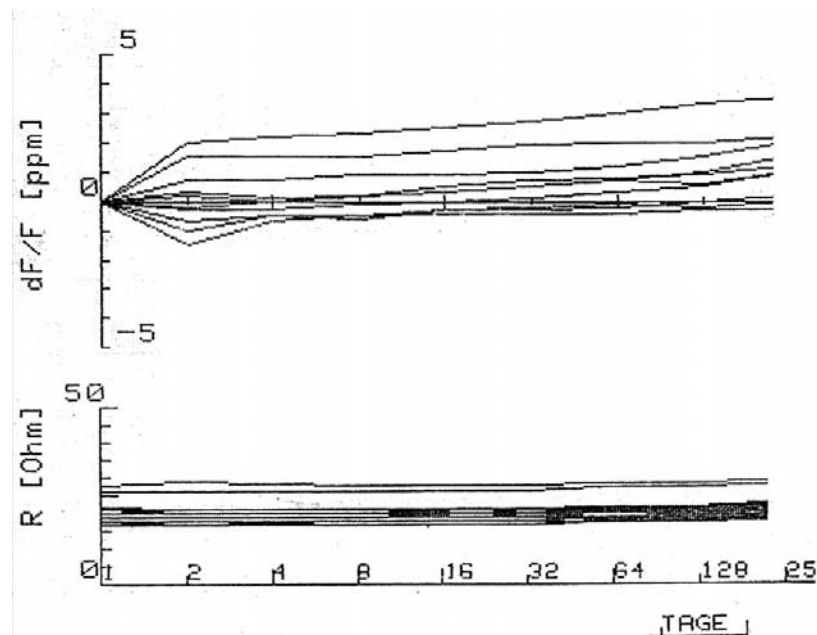


Abb. 2.45 Alterung, Meßergebnisse von Schwingquarzen aus der Serienproduktion

2.12.12 Wiedereinlauf der Frequenz

Bei der äußerst geringen Alterung von Präzisionsquarzen mit weniger als $\Delta f/f = 10^{-8}$ wird ein stabiler, eingelaufener Zustand vorausgesetzt, d.h. konstante Temperatur, konstante elektrische Belastung, konstantes Schwerfeld usw.. Schwingquarze dieser Genauigkeitsklasse werden in einem Thermostat betrieben. Nach dem Ausschalten und Wiedereinschalten der Betriebsspannung muß der Thermostat wieder auf Betriebstemperatur gebracht werden. Je kürzer die Aufheizzeit des Thermostaten, um so größer werden mechanische Spannungen im Quarzresonator durch Temperaturfelder (Stress) sein. Hierdurch treten zusätzlich zum Temperaturgang der Frequenz weitere Frequenzänderungen auf, der Quarz macht bei jedesmaligem Einschalten einen erneuten, kürzeren Alterungsprozeß durch. Diese Zeit nach dem Wiedereinschalten, bis zum Erreichen einer vorgegebenen Frequenztoleranz, wird die Wiedereinlaufzeit genannt. Die Hochlaufzeit des Thermostaten ist hieran maßgeblich beteiligt. Deshalb sollte eine exakte Prüfung nur mit dem zugehörigen Thermostat durchgeführt werden.

Eine übliche Angabe für die Wiedereinlaufzeit wäre z.B. 1 Stunde auf 3×10^{-9} , oder in 24 Std. auf 1×10^{-9} . Das Überspringen und die Einlaufzeit kann auf etwa 1/2 bis 1/3 durch den Einsatz von SC-Schnitt Quarzen reduziert werden. Der SC-Schnitt ist ein doppelt gedrehter Schnitt und wird wegen der hiermit verbundenen hohen Kosten nur in besonderen Fällen eingesetzt. Er hat außerdem noch den Vorteil, daß er bei den üblichen Thermostat-Temperaturen eine besonders flache Frequenz-Temperatur-Kurve hat. Gegen eine nahe zweite Resonanz müssen schaltungstechnische Maßnahmen getroffen werden.

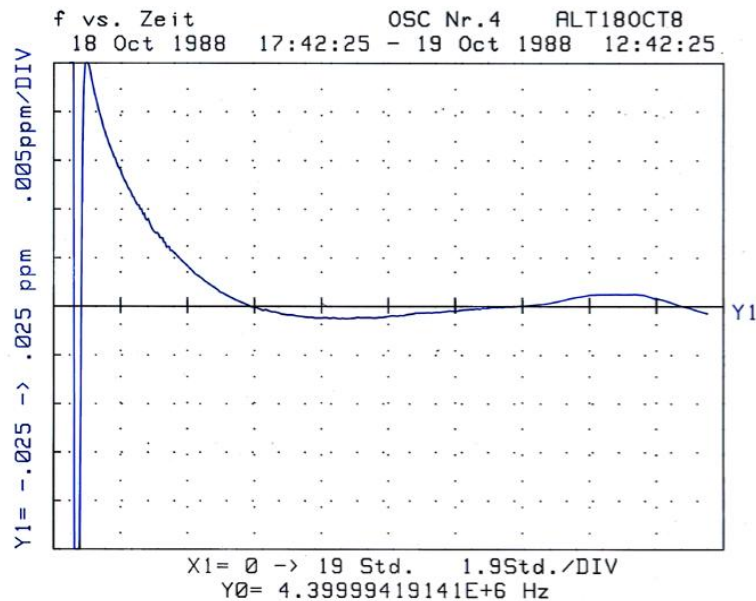


Abb. 2.46 Wiedereinlauf der Frequenz,
Beispiel eines Präzisionsquarzes

2.12.13 Kurzzeitstabilität der Resonanzfrequenz

Die Kurzzeitstabilität beschreibt die kurzzeitigen Änderung der Frequenzwerte oder Phasen um den statistischen Mittelwert der Frequenz. Diese Schwankungen finden im Bereich von Bruchteilen von Sekunden bis Minuten statt. Die Kurzzeitkonstanz kann im Zeitbereich oder im Frequenzbereich als Phasenrauschen angegeben werden (siehe mehr in den Kapiteln 4 und 7). Bei Schwingquarzen wird die Kurzzeitkonstanz meist im Frequenzbereich beurteilt. Hierfür werden die durch die Frequenz- bzw Phasenmodulation entstandenen Seitenbänder ausgewertet. Die Angaben erfolgen entweder als Einseitenbandphasenrauschen $\mathcal{L}(f)$. Es ist das Verhältnis

$$\mathcal{L} = \frac{\text{ESB-Leistungsdichte}}{\text{Signalleistung}} \quad (27)$$

Der Wert wird bezogen auf 1 Hz Bandbreite in dBc angegeben. Oder es wird die spektrale Leistungsdichte der Frequenzschwankungen $S_Y(f)$ angegeben.

An der guten Kurzzeitstabilität von Quarzoszillatoren ist der verwendete Schwingquarz maßgeblich als selektives Glied im Rückkoppelungsweig beteiligt. Für ein geringes Phasenrauschen eines Oszillators ist die hohe Schwingungsgüte Q des Resonators entscheidend. In der Simulation nach dem Leeson-Modell (Kap. 7.6) ist im trägernahen Bereich $\mathcal{L}(f) \approx 1/Q^2$. Gagnepain [12] fand bei Messungen an Quarzen im Abstand 1 Hz vom Träger sogar für das $1/f$ -Rauschen eine Abhängigkeit von $1/Q^4$ (Bild 2.47). Aber der Schwingquarz trägt auch selbst durch kurzzeitige Unstabilitäten zum Phasenrauschen

bei. Additive Rauschursachen des Quarzes sind der Elektrodenfilm, die Kontaktierung mit der Halterung, die Qualität der Oberfläche (Haarrisse) und vor allem die Sauberkeit der Oberfläche (Kontaminierung mit Fremdstoffen), die Schwingamplitude des Schwingquarzes. Allerdings hat auch die Anpassung des Quarzes an die Schaltung einen entscheidenden Einfluß auf die Kurzzeitstabilität des Oszillators. Eine Leistungsanpassung scheint optimal zu sein.

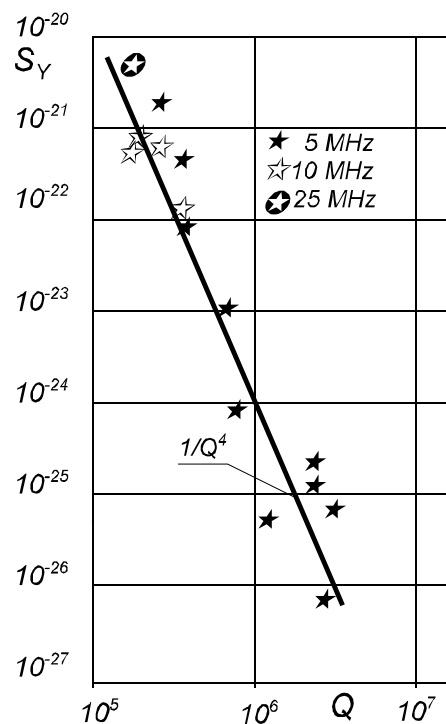


Bild 2.47 1/f-Frequenzrauschen S_Y (1Hz) in Abhängigkeit von der Quarzgüte Q .

2.13 Das Ersatzschaltbild

Das Ersatzschaltbild stellt die elektrische Wirkung des mechanischen Schwingers in der Schaltung dar. Nach der Theorie einer elektrisch-mechanischen Analogie entspricht die dynamische Kapazität C_1 der elastischen Nachgiebigkeit und die Induktivität L_1 der schwingenden Masse des Quarzresonators. Der Resonanzwiderstand R_1 wird durch die dynamischen Schwingungsverluste gebildet. Diese dynamischen Größen bilden einen elektrischen Serienkreis, dem die statische Kapazität C_0 parallel geschaltet ist (Bild 2.48).

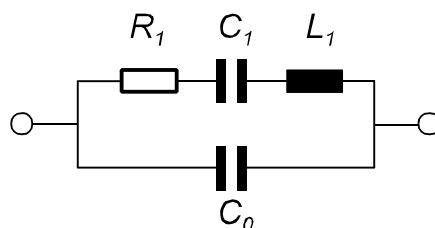


Bild 2.48 Ersatzschaltbild

Für hohe Frequenzen ist in besonderen Fällen das einfache Ersatzschaltbild nach Bild 2.48 nicht ausreichend. Im erweiterten Ersatzschaltbild (Bild 2.51) werden die Induktivitäten L_A der Halterungselemente im Quarzgehäuse (Bild 2.49) und der elektrische Widerstand R_E der aufgedampften Elektroden (Bild 2.50) berücksichtigt

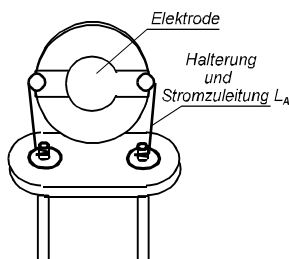


Bild 2.49
Halterinduktivität

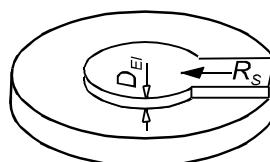


Bild 2.50
Elektrodenwiderstand

Die internen Zuleitungsinduktivitäten der größeren Quarzgehäuse können nicht in das vereinfachte Ersatzschaltbild einbezogen werden. Jedoch sind die bei höheren Frequenzen gebräuchlichen kleinen Quarzgehäuse mit Bandhalterungen so kurz, daß diese Induktivitäten meist klein genug sind. Bei Schwingquarzen höherer Frequenz muß mit Rücksicht auf eine möglichst kleine Massenbelastung des Schwingers eine sehr dünne Anregungselektrode aufgedampft werden. Hierdurch ergibt sich eine schlechte Leitfähigkeit der dünnen Elektrodenbeschichtung. Bei Frequenzen über 100 MHz kann der elektrische Widerstand der Elektrode die Größenordnung des Resonanzwiderstandes annehmen. Immer wenn eine genauere Nachbildung des

Scheinwiderstandsverlaufes gebraucht wird, ist auf das erweiterte Ersatzschaltbild zurückzugreifen.

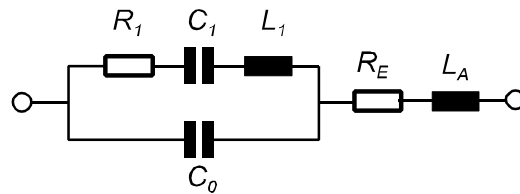


Bild 2.51 Erweitertes Ersatzschaltbild

Für die normalen Rechnungen mit den Ersatzdaten wird im Folgenden weiterhin das einfache Ersatzschaltbild nach Bild 2.48 zugrunde gelegt.

2.13.1 Die statische Parallelkapazität C_0

Die statische Parallelkapazität C_0 ist die an den Anschlüssen des Schwingquarzes unmittelbar meßbare Kapazität. Sie ist die Elektrodenkapazität C_E , vermehrt um die Halterungs- und Streukapazitäten C_H innerhalb des Schwingquarzgehäuses. Die Elektrodenkapazität C_E wird durch die im allgemeinen beidseitig auf die Resonatoroberflächen aufplattierten Anregungselektroden gebildet. Der Abstand dieser Elektroden ist die Dicke d des Resonators, die bei Dickenschersungsschwingern durch die Resonanzfrequenz f_r gegeben ist. Aus der Gleichung für die Kapazität eines Plattenkondensators folgt:

$$C_E = \epsilon_0 \epsilon_{ii} \frac{A}{d} \quad (28)$$

$$\epsilon_0 = 0,886 \cdot 10^{-14} \text{ F/mm}; \quad \epsilon_r = 4,7; \quad A = \text{Elektrodenfläche (mm}^2\text{)}$$

$$C_E \approx 2 \cdot 10^{-5} E^2 \frac{f}{n} \quad (29)$$

E = Elektrodendurchmesser (mm); f = Resonanzfrequenz (kHz); n = Oberton
Die Gehäusekapazitäten C_H sind mit etwa 0,8 pf anzusetzen. Mit den Gehäusekapazitäten C_H entsteht ein neues erweitertes Ersatzschaltbild (Bild 2.53).

Die beiden Streukapazitäten C_{HA} und C_{HB} werden durch die Kapazitäten zwischen den Elektroden und dem Gehäuse und durch die Kapazitäten der Stromdurchführungen gebildet. Diese Tatsache ist bei der Messung der statischen Kapazität C_0 zu berücksichtigen, insbesondere wenn die Kapazität C_0 mit einseitig geerdetem Anschluß gemessen wird und anschließend die dynamische Kapazität C_1 ermittelt werden soll (Kapitel 2). Die Größe der Gehäusekapazität $C_H = C_{Ha} + C_{Hb}$ hängt auch von der äußeren Beschaltung ab, da ja im Extremfall einer der beiden Streukapazitäten bei niederohmigem Abschluß und geerdetem Gehäuse kurzgeschlossen sein kann.

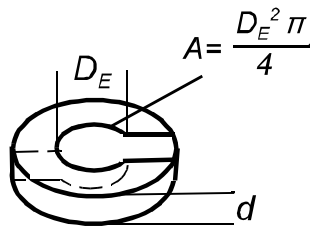


Bild 2.52 Elektrodenfläche

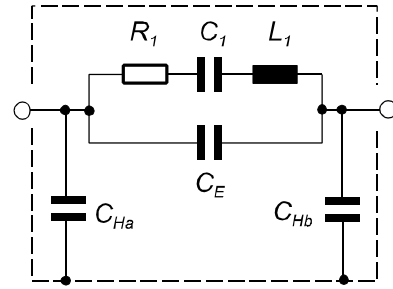


Bild 2.53 Streukapazitäten C_H

2.13.2 Die dynamische Kapazität C_1

Die dynamische Kapazität C_1 wird bestimmt durch die elastische Konstante s_{ij} und die piezoelektrische Konstante d_{ij} . Sie ist weiterhin, allerdings im Gegensatz zur statischen Kapazität beschränkt auf den schwingenden Teilbereich des Resonators, von der Elektrodenfläche A , der Dicke d , der Oberflächenkrümmung des Resonators

$$C_1 = \frac{32 \epsilon_0 \epsilon_{ij}}{\pi} \frac{d_{ij}^2}{s_{ij}} \frac{E^2}{d} \frac{1}{K_r n^2} \quad (30)$$

und der Ordnung des Obertons n abhängig (Bild 2.52).

Mit C_0 erhalten wir das Kapazitätsverhältnis r :

$$\frac{C_0}{C_1} = r \quad \text{Oberton:} \quad \frac{C_0}{C_1} = n^2 r \quad (31)$$

Der Korrekturfaktor für die Oberflächenkrümmung (Linsenquarz) K_r liegt etwa zwischen 1 und 2,5. Für planparallele Resonatoren im Grundton ist $K_r = 1$, das Ka-

pazitätsverhältnis r etwa 200...220, im Oberton ist r etwa n^2 mal größer. Die materialtypischen Werte der elastischen Konstanten s_{ij} und der piezoelektrischen Konstanten d_{ij} sind beim kristallinen Quarz richtungsabhängig. Damit ergeben sich für verschiedene Quarzschnitte unterschiedliche, typische Ersatzdaten. Durch die Richtungsabhängigkeit der piezoelektrischen Konstanten ergeben sich auch geringfügig unterschiedliche Werte der Ersatzdaten in Abhängigkeit von der Richtung der Anschlußfahnen der Elektroden zur Z-Achse.

2.13.3 Der Resonanzwiderstand R_1

Der Resonanzwiderstand R_1 resultiert aus den Dämpfungen des Resonators. Zur Ermittlung der Gesamtdämpfung ist es zweckmäßig, die Dämpfungskonstante

$\tau_1 = R_1 C_1$ einzuführen. Die Dämpfung der Dickenscherungsschwingung wird hauptsächlich hervorgerufen durch: die viskose Dämpfung des Materials τ_α , die Dämpfung durch die endlichen Abmessungen des Resonators τ_ϕ und die Dämpfung durch das den Resonator umgebende Gas τ_G (entfällt bei evakuierten Gehäusen) und dem meist vernachlässigbaren, elektrischen Widerstand der Elektroden τ_E .

$$\tau_1 = \tau_\alpha + \tau_\phi + \tau_G + \tau_E = R_1 C \quad (32)$$

$$\tau_1 = \frac{\eta_{66}}{c_{66}} + \frac{a}{\left(n \frac{D}{d}\right)^3} + \frac{0,412}{n \sqrt{f}} \sqrt{\rho_G \eta_G} \quad (33)$$

Die von inneren Verlusten des Materials abhängige Konstante τ_α beträgt bei in der Natur gefundenem Quarz (Bergkristall) $\tau_\alpha = 10 \cdot 10^{-15}$ s. Bei dem heute fast ausschließlich verwendeten synthetischen Quarz liegt dieser Wert je nach Qualitätsklasse des Materials bei $10 \dots 18 \cdot 10^{-15}$ s. Die erreichbaren Minimalwerte der von der Form des Resonators abhängigen Konstanten a betragen bei Planresonatoren $a = 100 \cdot 10^{-10}$, bei linsenförmigen Resonatoren $a = 5 \cdot 10^{-10}$. Die Werte für facettierte Planquarze liegen zwischen diesen beiden Werten. Bedingt durch notwendige Kompromisse in der Konstruktion und durch Fertigungsstreuungen liegen diese Werte a bis zum 3-fachen der angegebenen Minimalwerte, noch höher, wenn Sonderforderungen an weitere Parameter gestellt werden (Bild 2.54).

Die Tatsache, daß ein bestimmtes Produkt $R_1 C_1$ bei festgelegten Resonatorabmessungen nicht unterschritten werden kann, könnte dazu verleiten, zur Erzielung kleinerer Resonanzwiderstände den Wert C_1 durch sehr große Elektroden zu vergrößern. Aus Stabilitätsgründen ist hiervon abzuraten, weil durch Vergrößern des schwingenden

Bereiches der Rand des Resonators nicht mehr in Schwingungsrufe ist, die Halterung wird auf die Dickenschersungsschwingung Einfluß nehmen. Außerdem haben durch den großen Wert von C_1 Schaltungskapazitäten einen größeren Einfluß auf die Arbeitsfrequenz. Beide Faktoren sind unerwünscht. Vielmehr sollte die Oszillatorschaltung so ausgelegt werden, daß eine genügende Rückkopplungsreserve vorhanden ist, zumal auch etwaige Schwankungen des Resonanzwiderstandes über den Temperaturbereich und die Belastungsabhängigkeit des Resonanzwiderstandes aufgefangen werden müssen. Da auch der Verstärkungsfaktor von Halbleiterschaltungen meist Temperatur und Betriebsspannungsschwankungen unterliegt, führt eine Auslegung der Schaltung ohne Reserven immer zu Problemen, spätestens bei der Serienproduktion der Geräte.

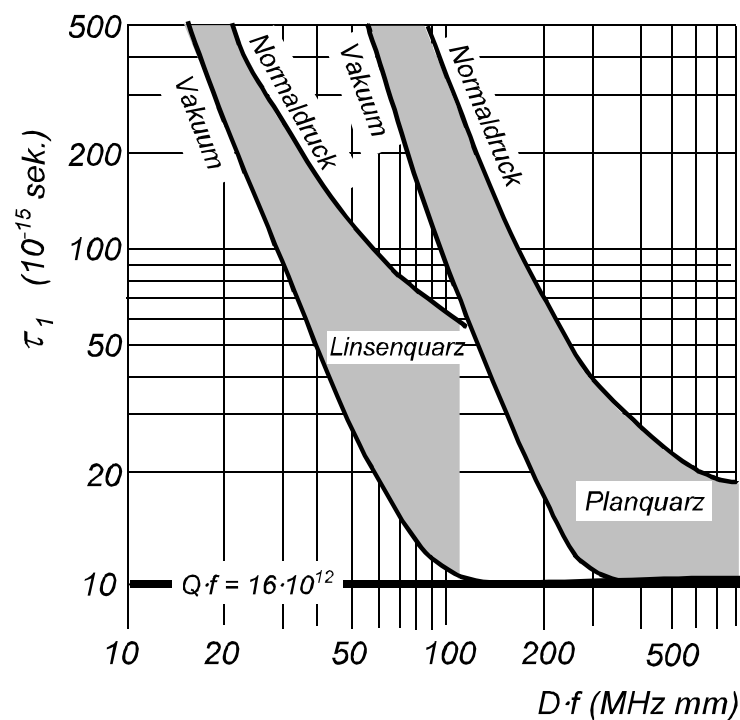


Bild 2.54 τ_1 für AT-Schnitt-Quarze

2.13.4 Die Schwingungsgüte Q

Die Schwingungsgüte Q :

$$Q = \frac{1}{\omega C_1 R_1} = \frac{\omega L_1}{R_1} \quad (34)$$

ist bei ausreichend großem Resonatordurchmesser und evakuierten Gehäusen, also unter idealisierten Bedingungen durch die viskosen Verluste des Materials begrenzt. Entsprechend Kap.2.13.3 ist die maximal erreichbare Güte frequenzabhängig, sie nimmt mit zunehmender Frequenz ab (Bild 2.55):

$$Q \cdot f \approx 16 \cdot 10^{12} \quad (35)$$

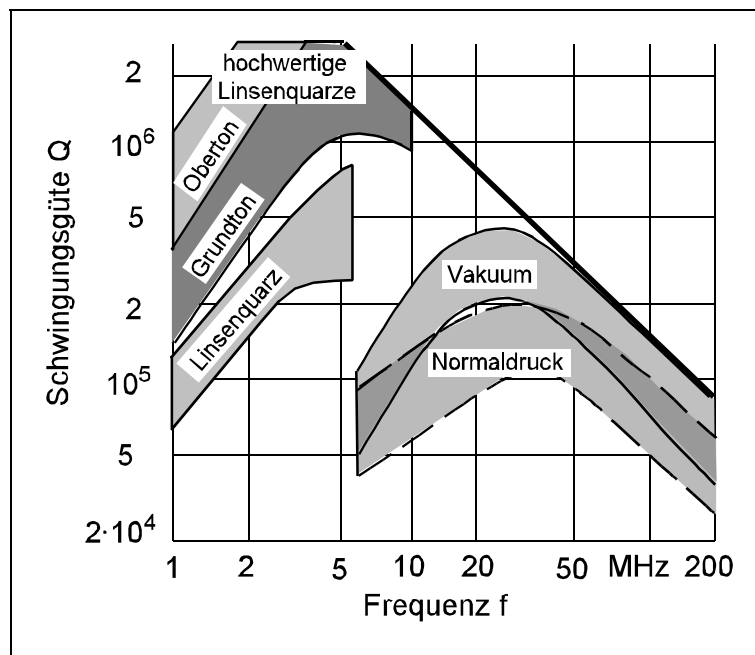


Bild 2.55 Schwingungsgüte bei AT-Schnitt Quarzen

S

chwingquarze mit besonders hoher erforderlicher Schwingungsgüte werden deshalb im Frequenzbereich 2...5 Mhz hergestellt. Andererseits hat es keinen Sinn, Schwingquarze höherer Frequenz als 200 MHz einzusetzen, weil durch die hier klein werdende Güte, die Kurzzeitkonstanz (Phasenrauschen) ungünstige Werte annimmt. In diesem Fall wird man mit entsprechender elektronischer Frequenzvervielfachung bessere Resultate erzielen.

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

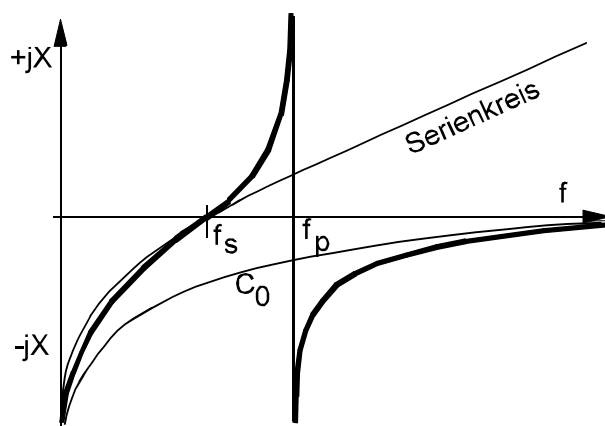


Bild 2.56 Blindwiderstandsdiagramm

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad (36)$$

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

Der relative Frequenzabstand zwischen den beiden Frequenzen ist:

$$\frac{f_p - f_s}{f_s} = \frac{1}{2r} \quad \text{mit } r = \frac{C_0}{C_1} \quad (38)$$

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

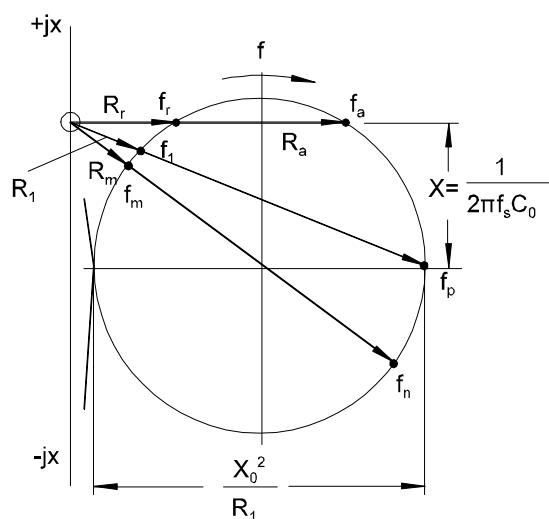


Bild 2.57 Ortskurve des Quarzscheinwiderstandes

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** f_n . 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 $L_{\text{Komp.}}$ (Bild 2.58). Dies ist auch bei Messungen zu beachten.

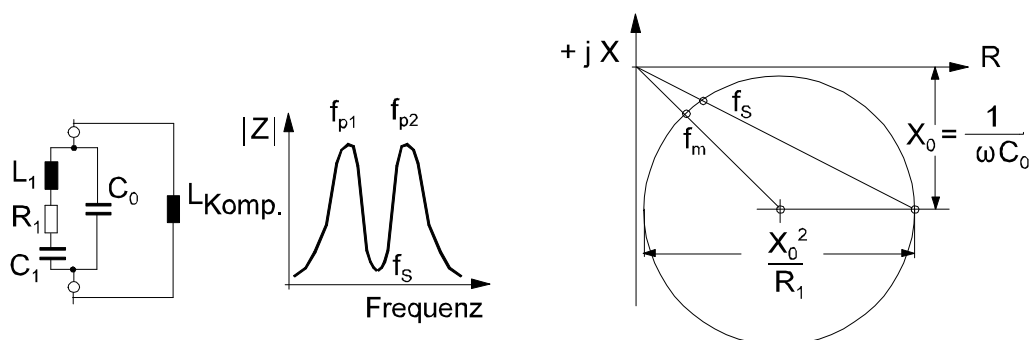


Abb. 2.58 C_0 - Kompensation

2.14.3 Der Schwingquarz mit Lastkapazität

Der Rückkopplungsweig 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 Bild 2.59 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.

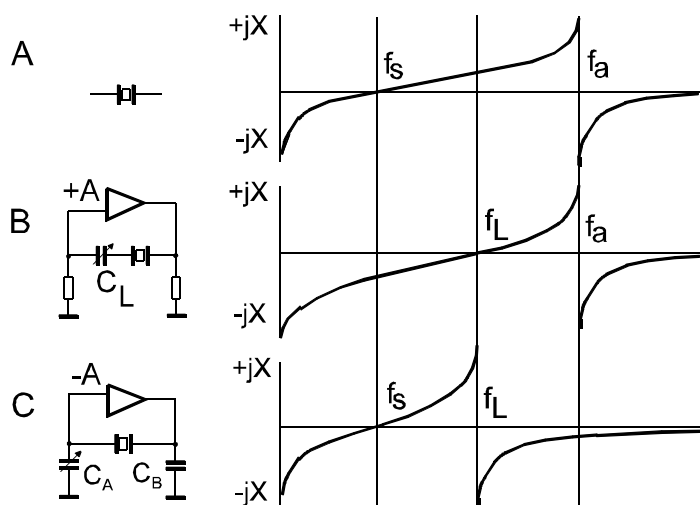


Bild 2.59 Blindwiderstandsdiagramm mit Lastkapazität

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:* $1/CL \sim 1/CA + 1/CB$. Die Lastresonanzfrequenz f_L liegt bei kapazitiver Last also immer über der Serienresonanzfrequenz f_s .

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

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:

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

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

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

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

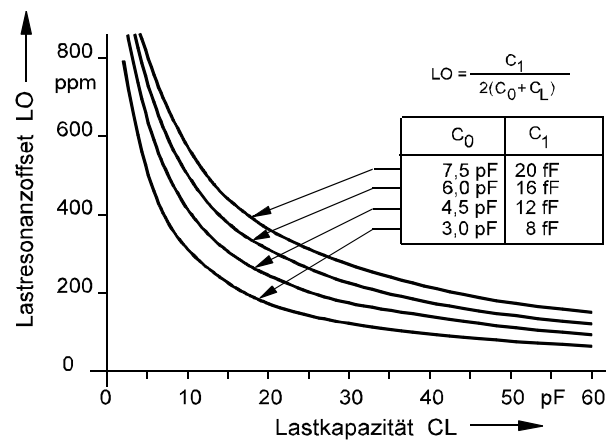


Bild 2.60 Lastresonanzoffset LO
bei Quarzen unterschiedlicher Ersatzdaten

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

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

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.

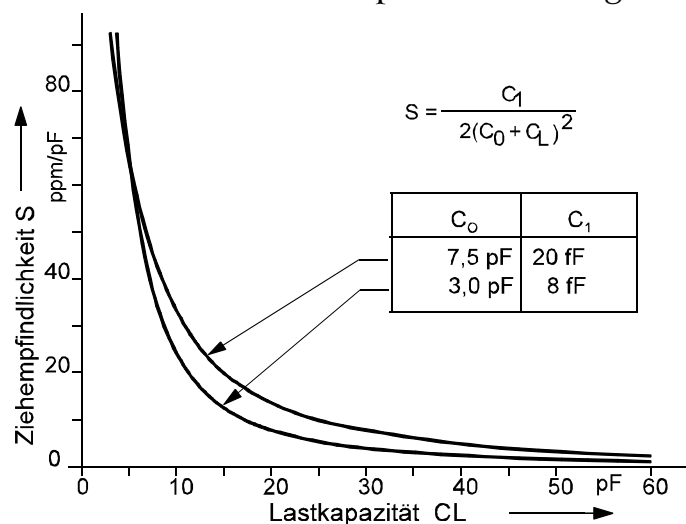


Bild 2.61 Ziehempfindlichkeit S
bei Quarzen unterschiedlicher Ersatzdaten

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)

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

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.

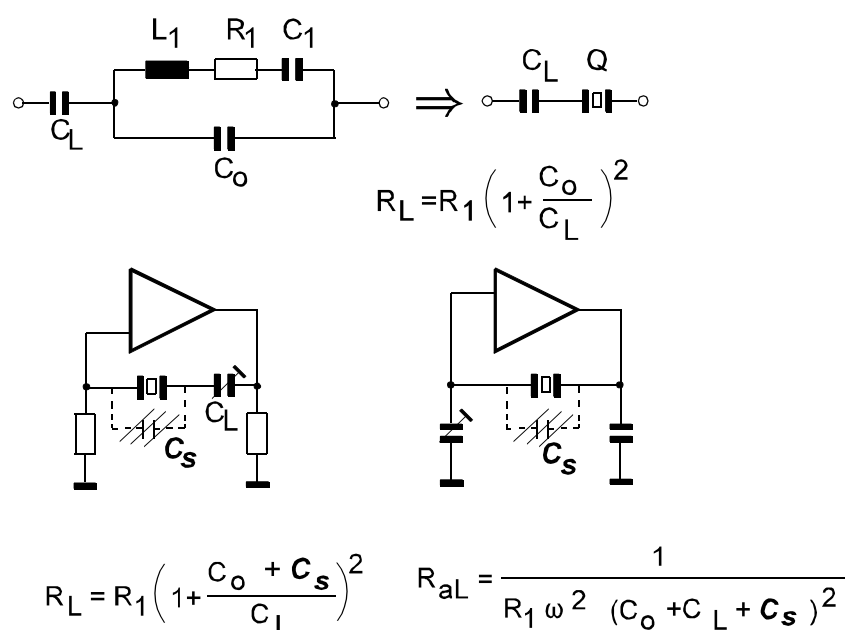


Bild 2.62 Transformation der Ersatzdaten

Der bei der Antiresonanzfrequenz f_a auftretende Parallelwiderstand R_a wird bei Parallelschaltung einer Lastkapazität C_L zum effektiven Parallelwiderstand R_{aL} transformiert (siehe Ortskurve des Scheinwiderstandes):

$$R_a = \frac{1}{R_1(2\pi f C_0)^2} \quad (44)$$

und

$$R_{aL} = \frac{1}{R_r(2\pi f)^2 (C_0 + C_L)^2} \quad (45)$$

2.15 Ziehen der Quarzfrequenz im Oszillator

Bei der funktionellen Beeinflussung der Frequenz durch eingefügte Blindkomponenten, oder durch Verändern der Phasenlage im Rückkopplungsweg (Ziehen der Quarzfrequenz) sind einige unerwünschte Eigenschaften der Quarze zu beachten:

2.15.1 Kompensation des Temperaturganges der Frequenz (TCXO)

Die Kompensation des Temperaturganges des TCXO erfolgt durch die temperaturabhängige Steuerung der Lastkapazität. Die für TCXO-Anwendungen einzusetzenden Quarze müssen über den Arbeitstemperaturbereich absolut dipfrei sein. Selbst kaum erkennbare Dip's, wie z.B. in Bild 2.31 bei etwa -20°C oder 85°C wirken nach der Kompensation als störender Restfehler der Frequenz. Aus den in 2.12.6 geschilderten Gründen ist die Quarzbelastung klein zu halten. Ebenso störend ist die Hysterese des Temperaturganges der Frequenz nach Umkehr der Richtung der Temperaturänderung. Bei der Bestellung von Schwingquarzen für TCXO-Anwendungen sind beide Eigenschaften zu spezifizieren:

- 1) Unstetigkeit der Frequenz-Temperaturkurve max. xx ppm
- 2) max. zulässige Hysterese im Arbeitstemperaturbereich xx ppm bei einer min. Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur von xx°C/min.

2.15.2 Ziehverhalten und Nebenresonanzen

In Filterschaltungen und Quarzdiskriminatoren ist die Auswirkung der Nebenresonanzen leicht übersehbar. In Oszillatorschaltungen ist ein Anschwingen auf Nebenresonanzen oder ein Umspringen auf eine Nebenresonanz bei richtiger Auslegung der Schaltung nicht möglich (siehe auch 2.12.10). Komplexer ist der Einfluß des Obertones mit seinen Nebenresonanzen auf das Verhalten von VCXO-Schaltungen:

Ein Quarzoszillator ist ein rückgekoppelter Verstärker mit einem Schwingquarz im Rückkopplungsweig. Der Oszillator schwingt mit der Frequenz, bei der die Schleifenverstärkung größer als eins ist und die Phasendrehung der gesamten Schleife den Wert $2n\pi$ hat, d.h. mit der Frequenz, bei der die Schleife reell ist. Die Bedingung der Schleifenverstärkung ist nur bei der Resonanzfrequenz des Quarzes erfüllt, für die der Oszillator konstruiert ist. Die Phasenbedingung wird durch alle Resonanzen des Quarzes beeinflußt, die zur Schwingfrequenz des Oszillators harmonisch sind. Durch die Amplitudenbegrenzung des Oszillators hat die Oszillatorfrequenz einen großen Oberwellenanteil. Dieses Frequenzgemisch wird dem Rückkopplungsweig

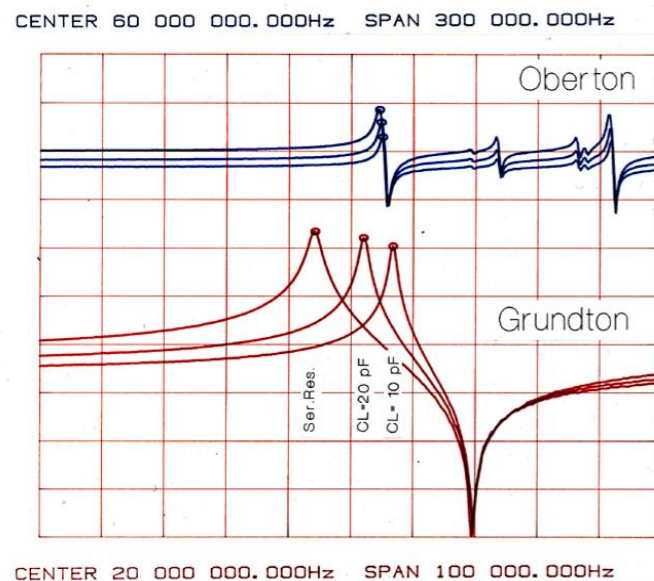


Abb. 2.63 Ziehverhalten von Grundton und Oberton

zugeführt. Bei Übereinstimmung einer Oberwelle der Oszillatorfrequenz mit einem Oberton des Quarzes, oder dessen Nebenresonanz wird die Phasenlage des zurückgekoppelten Signals beeinflußt. Dies wird beim starken "Ziehen" der Oszillatorfrequenz bedeutsam, besonders bei Grundtonoszillatoren. Die dynamische Kapazität C_1 des Quarzes und damit der Ziehbetrag ist im Grundton etwa 9 mal größer als der, des 3.ten Obertones. Es ist also möglich, daß eine Resonanz des Quarzes im Obertonbereich harmonisch zum Grundton wird (Bild 2.63).

Die Folge ist eine Diskontinuität in der Ziehkennlinie des Oszillators an dieser Stelle. In Systemen mit statischen Frequenzregelungen ist dies alles unbedeutend. In Systemen mit phasenabhängiger Frequenzsynchronisation wird die Synchronisation erheblich gestört, oder unmöglich, zB. die Synchronisation des Farbhilfsträgers mit einem Renck-Oszillator beim digitalen Fernsehen. In der Anwendung als Frequenz- oder Phasenmodulator entsteht eine Unstetigkeit in der Modulationskennlinie. Die Störungen werden besonders stark, wenn der Oszillatorausgang zur Frequenzvervielfachung selektiv auf die dreifache oder fünffache Oszillatorfrequenz abgestimmt wird. Bild 2.63 zeigt die Abhängigkeit der Grundtonfrequenz (unten) und der Obertonfrequenz (oben) von der Ziehkapazität C_L .

2.15.3 Ziehen der Quarzfrequenz durch Phasenregelung

In Systemen mit digitaler Frequenzaufbereitung wird auch die Frequenzabstimmung durch Regelung der Phase des rückgekoppelten Signals in der Oszillatorschleife vorgenommen. Ein Beispiel hierfür ist der "Renck-Oszillator" in Schaltungen des digitalen Fernsehens. Die phasenabhängige Steuerung der Frequenz erfolgt im Prinzip nach Bild 2.64.

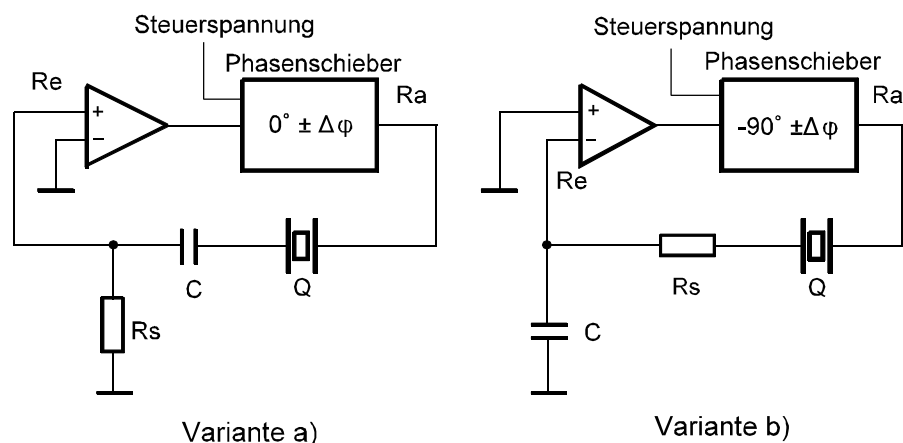


Bild 2.64 Phasengeregelter Oszillator, Prinzip

Eine Steuerspannung U_{st} erzwingt im Phasenstellglied eine entsprechende Phasendrehung. Die Oszillatorfrequenz folgt dann gemäß der Gleichung (48) dieser Phasendrehung.

$$\frac{2\Delta f}{f} = -\frac{\tan\varphi}{Q_{eff}} \quad (46)$$

Der Ziehbetrag hängt bei Vernachlässigung von C_0 vom Produkt $C_1 \cdot R_{eff}$ ab. In Oszillatorschaltungen mit kleinen Innenwiderständen R_e und R_a ist der durch die

$$\text{mit } Q_{eff} = \frac{1}{\omega C_1 R_{eff}} \quad \text{und} \quad R_{eff} = R_1 + R_s + R_e + R_a \quad (47)$$

Phasenänderung erzielte Frequenzhub relativ klein. Zur Vergrößerung der Hubsteilheit wird ein Dämpfungswiderstand R_s in die Schaltung eingefügt (Gl.47).

$$\frac{-\Delta f}{\tan \varphi} = \pi f^2 C_1 R_{eff} \quad (48)$$

Die Schaltung ist besonders kritisch gegen Resonanzen des Quarzes bei der dreifachen Oszillatorfrequenz, insbesondere die Variante a), die im Rückkopplungsweig einen Hochpaß $R_s C$ enthält (Bild 2.64). Erheblich besser ist die Variante b), hier wirkt der Rückkopplungsweig als Tiefpaß und verringert den Oberwellenanteil im Rückkopplungsweig erheblich. Der Oszillatorverstärker muß in diesem Fall ein invertierender Verstärker sein, der Phasenschieber erzeugt eine Grundphasendrehung von -90° .

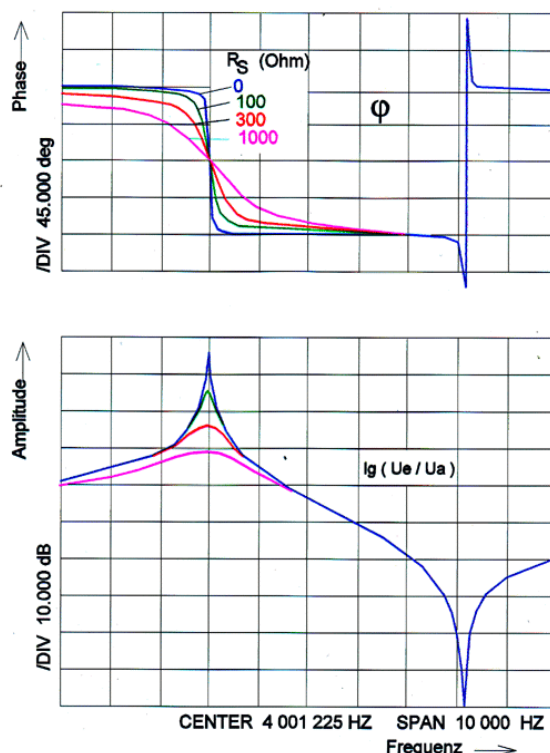


Abb. 2.65 Phasengang im Rückkopplungsweig
 $R_A + R_B = 25 \Omega$, R_s = Parameter

Der in dieser Schaltung verwendete Schwingquarz darf also bei den n-fachen Werten der Arbeitsfrequenz keine Resonanzen haben. Quarze (Dickenscherschwinger) haben bei Vielfachen ihrer Grundtonfrequenz nur in der Nähe ihrer Obertöne Resonanzen, im Falle eines Grundton-Oszillators ist also die dreifache Frequenz kritisch, die fünf-fache Frequenz ist bereits genügend gedämpft. Bei der Bestellung der Quarze ist dann also zusätzlich anzugeben, daß der Quarz z.B. bei der 3-fachen Nennfrequenz \pm dem Hub des Oszillators frei von Resonanzen sein muß. Im Fall der Version b) genügt hier eine Unterdrückung der Resonanzen um etwa 12 dB. Im Fall eines Oszillators im 3.Oberton liegen die kritischen Frequenzen um den 5.Oberton des Quarzes, also um $5/3$ der Oszillatorfrequenz Bild 2.63).

2.16 Andere Nutzung der Scherungsschwingung von Schwingquarzen

Der Schwingquarz als Filterelement. - Passiv erregte Schwingquarze werden als Filterelement in Filterschaltungen mit einem oder mehreren Quarzen eingesetzt (siehe speziell Abschnitt Quarzfilter). Eine Besonderheit stellen hierbei die monolithischen Filterelemente dar. Sie nutzen die sonst als Nebenresonanzen störenden Schwingungsmoden der Dickenscherschwingung (Kap.2.12.10, Bild 2.39). Im Falle der "Dual's" werden die beiden Schwingungsmoden symmetrisch $n_1 m_1 p_1$ und antimetrisch $n_1 m_2 p_1$ genutzt.

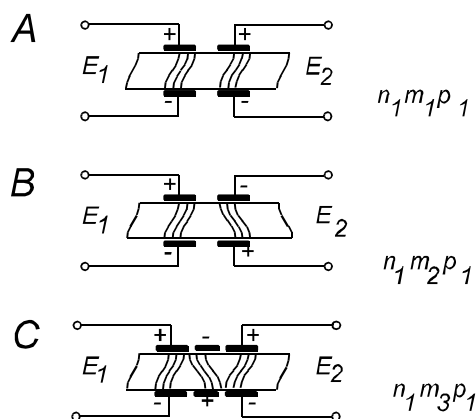


Bild 2.66 Moden der Scherungsschwingung bei monolithischen Quarzfiltern

Aus den Bewegungsrichtungen und den dazugehörigen Polaritäten in Bild 2.66 A und B kann für die gleichzeitige Nutzung beider Bewegungsarten (Schwingungsmoden) das Ersatzschaltbild nach Bild 2.67 gezeichnet werden. Durch Variation der Elektrodenfläche und des Elektrodenabstandes können Bandbreite und Dämpfungsverlauf beeinflußt werden. Die Realisierung von mehrpoligen Filterelementen durch die Anwendung von Moden höherer Ordnung ist möglich (Bild 2.66 C), erfordert aber einen sehr hohen Aufwand in der Präzision der Herstellung derartiger Filter.

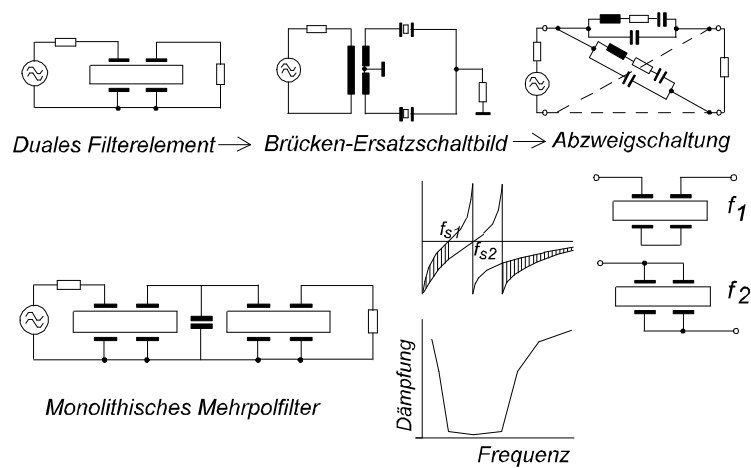


Bild 2.67 Monolithische Quarzfilter

2.17 Andere Wellenformen

Neben der bisher beschriebenen Nutzung von Volumenwellen (Bulkwave) werden auch Oberflächenwellen (OFW) (auch SAW = Surface Acoustical Wave) auf Quarzsubstraten genutzt. Überwiegend werden die OFW für Filter eingesetzt, aber auch als Resonator für Oszillatoren hoher Frequenzen (200 - 1000 MHz) und als Laufzeitglieder. Oberflächenwellen auf elastischen Körpern wurden zuerst von Rayleigh beschrieben (Lord Rayleigh, Proc. Math. soc. London 1887). Im Gegensatz zur Volumenschwingung, in der sich die akustische Welle im Schwingkörper (Resonator) ausbreitet, breitet sich die Welle der Oberflächenwellenschwingung nur auf der Oberfläche des Resonators aus (Bild 2.68). Die Eindringtiefe in den Körper des Resonators ist äußerst gering, sie beträgt etwa 2 Wellenlängen. Dadurch ist eine einfache und robuste Montage in einem Gehäuse möglich. Das Oberflächenelement braucht nur mit seiner unaktiven Unterseite auf einen Träger geklebt zu werden.

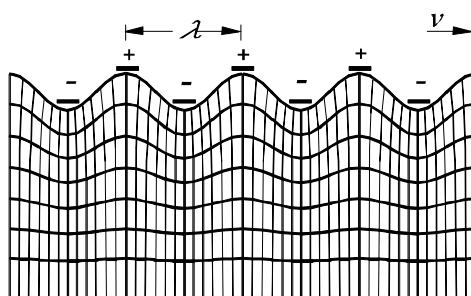


Abb. 2.68, Bewegung der Oberflächenwelle

Die Oberflächenwellen werden durch Elektrodenpaare auf ein und derselben Oberfläche des piezoelektrischen Wandlers erregt (Bild 2.69). Der Abstand d der Elektroden ist gleich der halben Wellenlänge λ ($d = \lambda/2$), er bestimmt die Eigenfrequenz des Resonators, die Anzahl der Elektroden (Finger) die "Resonanzschärfe".

Mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit v der Oberflächenwelle erhalten wir die Eigenfrequenz f_0 des Oberflächenelementes.

$$f_0 = \frac{nv}{\lambda} = \frac{nv}{2d} \quad (49)$$

Die Eigenfrequenz eines Oberflächenwellenelementes ist also bei der durch das Material vorgegebenen Ausbreitungsgeschwindigkeit v , nur vom Abstand der Elektroden abhängig. Die für die Anregung der Oberflächenwellen erforderlichen, kammartigen Elektroden, werden mit fotolithografischen Verfahren aufgebracht.

Durch die technischen Grenzen dieses Verfahrens und der notwendigen Poliertechnik

zur Erzeugung der ebenen und mikrostrukturarmen Oberflächen ist die obere Frequenzgrenze der OFW-Elemente gegeben. Der Frequenzbereich von OFW-Elementen erstreckt sich damit von etwa 80 MHz bis 1000 MHz, schließt also an den Frequenzbereich der Volumenwellen an.

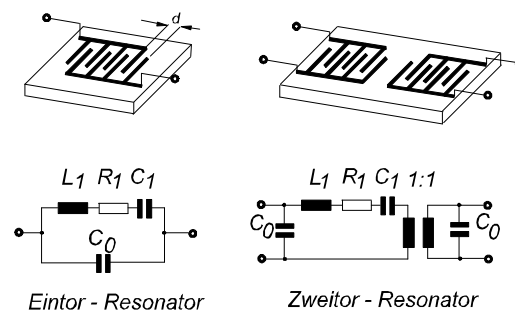


Bild 2.69 Oberflächenresonator

Die für OFW-Elemente verwendeten Schnittwinkel $\theta = 36^\circ$ und 42° liegen nahe dem AT-Schnitt mit $\theta = 35^\circ$.

Die erreichbaren, frequenzabhängigen Schwingungsgüten entsprechen der Gl.(35), mit dem Faktor $10 \cdot 10^{12}$ für evakuierte Gehäuse und $5,6 \cdot 10^{12}$ für Normaldruck. Sie liegen also etwa bei 125 000 bis 6 000. Die entsprechenden Ersatzschaltbilder sind in Bild 2.69 dargestellt. Entsprechend der Ähnlichkeit des Ersatzschaltbildes der Volumenschwinger ergeben sich gleiche Blindwiderstandsverläufe. Auch die Wirkung von dazugeschalteten Blindwiderständen ist identisch. Es war daher naheliegend analoge Begriffe aus der Schwingquarztechnik hier beizubehalten. Der Temperaturgang der Frequenz entspricht einer Parabel der Gl.(14). Die Parabelkonstanten sind etwa $a = (32 \cdot 10^{-9}/^\circ\text{C})$ und $T_0 = 25^\circ\text{C}$, Werte zwischen 0 und 70°C sind möglich.

f MHz	C_0 pF	R_1 Ω	r	C_1 fF	Q $\cdot 10^3$
50 MHz	10	25	12000	0,85	150
500 MHz	2	20	12500	0,8	20
1000 MHz	1	100	6300	0,16	10

2.18 Quarzgehäuse und Halterung

Der Quarzvibrator ist in einer Halterung montiert, so daß er gegen mechanische

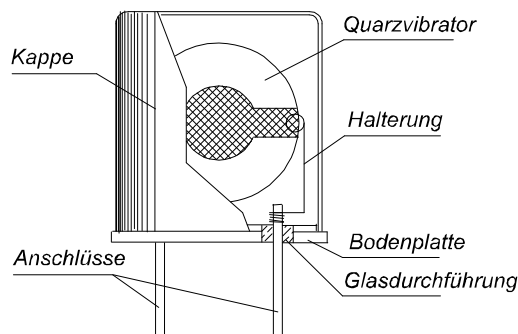


Bild 2.70 Schwingquarzgehäuse

Belastungen wie Stoß und Vibration geschützt ist. Diese Halterung ist so konstruiert, daß die Schwingungsgüte des Schwingquarzes möglichst wenig gedämpft wird. Außerdem wird über die Halterung die elektrische Verbindung zwischen den Anschlußdrähten und den Elektroden hergestellt. Das den Quarzvibrator in seiner Halterung umgebende Gehäuse schützt schließlich den Quarz vor mechanischen Beschädigungen und klimatischen und chemischen Einflüssen. Das Gehäuse ist normalerweise mit einem trockenen Gasgemisch aus 90% Stickstoff und 10% Helium gefüllt.

Der Heliumanteil dient zur Prüfung der Gehäuse auf Dichtheit mit einem Massenspektrometer. Der Taupunkt des Gasgemisches muß unterhalb der tiefsten Anwendungstemperatur der Schwingquarze liegen, damit es nicht zu Taupunkterscheinungen kommt. Bei Anwesenheit von Wasserdampf im Gehäuse z.B. bei undichtem Gehäuse, werden die Schwingquarze eine sehr schlechte Langzeitstabilität haben. Bei besonders hohen Ansprüchen an die Schwingungsgüte und Langzeitkonstanz der Schwingquarze werden die Gehäuse evakuiert. Für evakuierte Gehäuse sind besonders die Verschlußarten Glasverschmelzung und Kaltschweißtechnik geeignet.

Die Gehäuse sind in ihren Größen und der Verschleißtechnik genormt:

DIN 45 110

IEC 122-3

MIL H-10056

2.19 Verschlußtechniken

2.19.1 Löttechnik

Die gelöteten Gehäuse bestehen aus einer Gehäusekappe aus Neusilber und einer Bodenplatte aus Kovar mit in Glas eingeschmolzenen Durchführungsdrähten oder Stiften, ebenfalls aus Kovar (angepaßte Einglasung). Die Gehäusekappe wird in eine verzinnte Sicke in der Bodenplatte durch Reflowlötung eingelötet. Die Kappe hat zu diesem Zeitpunkt eine Öffnung (Loch) zum Druckausgleich beim Lötvorgang. Durch diese Öffnung muß nach dem Verschluß die eingeschlossene Luft durch getrockneten Stickstoff und 10% Helium ersetzt werden. Diese Öffnung wird

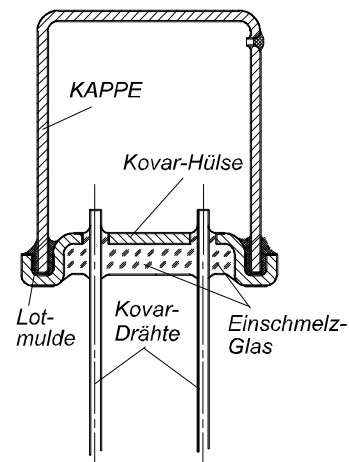


Bild 2.71 Löttechnik

dann durch Verlöten geschlossen. Bei dieser Verschlußtechnik besteht immer die Gefahr, daß Flußmittelreste oder Abdampfungen des Lotes in das Gehäuseinnere gelangen. Die Stabilität des Schwingquarzes wird hierdurch ungünstig beeinflusst.

2.19.2 Kalt-Preß-Lötung

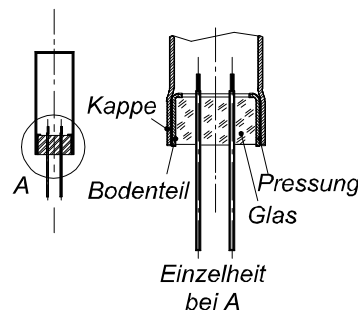


Bild 2.72 Kalt-Preß-Lötung

Die Kaltpreßlötung wird bei miniaturisierten Schwingquarzen in runden Gehäusen (Röhrchengehäusen) angewendet. Die verzinnte Gehäusekappe wird unter hohem Druck auf das ebenfalls verzinnte Bodenteil geschoben (gepreßt). Die Kappe wird hierbei leicht verformt (aufgeweitet). Durch den hohen Druck kommt es zur örtlichen Verschmelzung des Zinns. Technologisch liegt diese Verschlußart zwischen der Lötung und der Kaltverschweißung. Die Verbindung der Kappe mit der Bodenplatte wird im Vakuum oder unter Stickstoffatmosphäre durchgeführt. Die Prüfung der Dichtheit des Verschlusses ist wegen des kleinen Gehäusevolumens problematisch.

2.19.3 Kaltschweißung (Cold-Weld = CW)

Der Aufbau der Halterung entspricht im Prinzip der gelöteten Version. Die Gehäusekappe ist aus Kupfer, vernickelt. Die Bodenplatte mit der Glasdurchführung ist aus Kovar, kupferplattiert und vernickelt. Beide, Bodenplatte und Gehäuseplatte, werden unter so hohem Druck, ohne äußere Wärmezufuhr zusammengepreßt, daß eine gasdichte Verschweißung eintritt. Die Verschweißung erfolgt in einem Kabinett mit Stickstoff- Heliumatmosphäre oder im Vakuum. Dieser sehr saubere Verschluß ermöglicht sehr geringe Alterungsbeträge der Quarze.

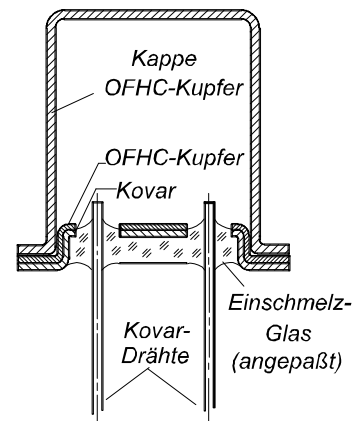


Bild 2.73 Cold Weld - Verschluß

2.19.4 Widerstandsschweißung (Resistance-Weld = RW)

Die heute am häufigsten angewendete Verschlußart ist der RW-Verschluß. Eine Stahl-Bodenplatte mit Druckglasdurchführungen wird mit einer Stahlkappe im Ringbuckel-Widerstands-Impuls-Schweißverfahren verschweißt. Die Bodenplatte hat eine Schneide (Ringbuckel), die unter einem Vordruck mit der Kappe zusammengedrückt wird. Unter erhöhtem Druck erfolgt die Verschweißung längs dieses Ringbuckels durch einen Stromimpuls. Dieser Verschluß erfolgt unter Stickstoffatmosphäre mit einem 10% Anteil von Helium, zum Nachweis etwaiger Undichtheiten mit einem Heliumlecktester.

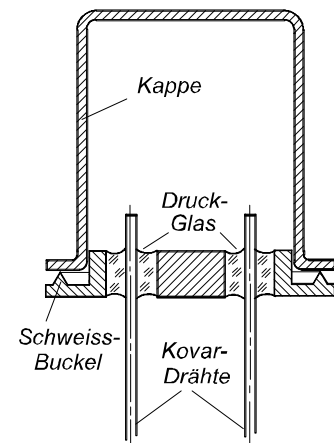


Bild 2.74 Widerstandsschweißung

2.19.5 Glaseinschmelzung

Für höchste Ansprüche an die Langzeitkonstanz wird die Allglastechnik angewendet. Bodenplatte und Kappe bestehen aus Glas. Für die induktive Erwärmung der Schmelzstelle trägt die Bodenplatte einen Kovarring. Die Verschmelzung erfolgt im Vakuum durch induktive Erwärmung. Durch die besonders günstigen Bedingungen zur Reinigung der Glasgehäuseteile vor der Montage und die durch diese Technik ermöglichten Hochtemperaturprozesse werden besonders gute Langzeitstabilitäten der Quarze erreicht. Die Glas-Verschlußtechnik ist sehr kostenaufwendig.

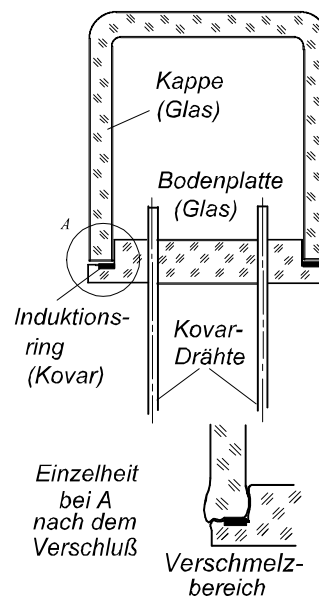


Bild 2.75 All-Glas-Gehäuse

2.19.6 Ceramic-Gehäuse SMD

Das Gehäuse ist in Mehrschichtkeramik hergestellt, sodaß die Stromdurchführungen durch die Keramik nach außen zu den verstärkten SMD Lötflächen erfolgen kann. Nach der Montage des Quarzschwingers, hier ein in Fotoätztechnik hergestellter Stimmgabelquarz, Dehnungsschwinger oder AT-Schnitt-Dickenschwinger, wird der Glas- oder Metalldeckel auf das Gehäuse im Vakuum

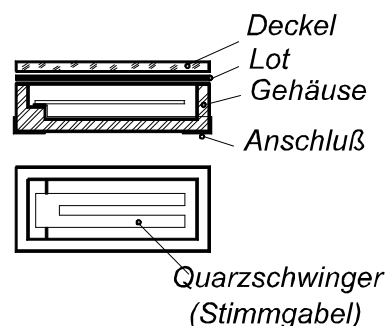


Bild 2.76 SMD-Keramik- Gehäuse

aufgelötet. Das Keramikgehäuseteil und gegebenenfalls der Glasdeckel sind hierfür an der Lötstelle metallisiert. Die Abbildung zeigt nur eine von vielen Varianten dieser Gehäusetechnik.

2.19.7 SMD-Gehäuse

Andere SMD-Gehäuse bestehen aus Metallgehäusen, die zur SMD-Montierbarkeit mit einem Kunststoffteil umpresst sind. Es ist nicht immer äußerlich erkennbar, welche Verschlußart sich in der Kunststoffumpressung verbirgt, sodaß keine allgemeingültigen Angaben über die Eigenschaften wie z.B. der Alterungssicherheit gemacht werden können.

2.20 Rechenbeispiele zum Kapitel 2.14

Beispiel 1: Der Hersteller des Schwingquarzes hat den Quarz genau auf der Serienresonanz abgeglichen. Mit welcher Lastresonanzfrequenz schwingt der Quarz mit einer Lastkapazität von $C_L = 30 \text{ pF}$?

Die Daten des Schwingquarzes sind: $f_r = 10\,000 \text{ kHz}$

$$C_0 = 5,5 \text{ pF}$$

$$C_1 = 25 \text{ fF}$$

$$f_L = f_r + f_r \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \quad (50)$$

Mit Gl.(39):

$$f_L = 10 \cdot 10^6 + 10 \cdot 10^6 \frac{25 \cdot 10^{-15}}{2(5,5 + 30) \cdot 10^{-12}} = 10003,521 \text{ kHz} \quad (51)$$

Die Lastresonanzfrequenz liegt also 3,521 kHz höher als die Serienresonanzfrequenz.

Beispiel 2: Wie groß ist die Frequenzänderung, wenn sich die Schaltungskapazität durch Temperatur, Betriebsspannung und Feuchtigkeit um 0,5 pF ändert ?

Die Daten:

Nominalkapazität der Schaltung: $C_L = 30 \text{ pF}$,

die Ersatzdaten des Quarzes: $f_r = 10\,000 \text{ kHz}$;

$$C_0 = 5,5 \text{ pF}$$

$$C_1 = 25 \text{ fF}$$

$$S = \frac{\delta f_L}{\delta C_L} = - \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)^2} \quad (52)$$

Mit Gl. (42):

$$S = - \frac{25 \cdot 10^{-15}}{2(35,5 \cdot 10^{-12})^2} = -9,9 \cdot 10^6 / F = -9,9 \cdot 10^{-6} / \text{pF} \quad (53)$$

Für eine Änderung der Schaltungskapazität um 0,5 pF

also $\Delta f/f = 4,9 \cdot 10^{-6}$

Beispiel 3:

Die Ermittlung der wirksamen Lastkapazität eines Quarzoszillators. Die

Serienresonanzfrequenz des oben genannten Schwingquarzes wurde genau ermittelt, sie beträgt $f_s = 9\,995\,507\text{ Hz}$. Die Ersatzdaten wurden ebenfalls gemessen: $C_0 = 5,5\text{ pF}$; $C_1 = 25,0\text{ fF}$.

Der Oszillator schwingt mit dem Quarz auf der Arbeitsfrequenz $f_w = 10\,000\,052\text{ Hz}$. Wie groß ist die Schaltungskapazität (wirksame Lastkapazität) ?

$$\frac{\Delta f}{f_r} = \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \quad (54)$$

$$C_L = \frac{f_s C_1}{2\Delta f} - C_0 \quad (55)$$

$$C_L = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 25 \cdot 10^{-15}}{2 \cdot 4545} - 5,5 \cdot 10^{-12} = 23\text{ pF} \quad (56)$$

Mit $\Delta f = f_w - f_s = 4545\text{ Hz}$:

Sollte bei dieser Messung die Arbeitsfrequenz f_w tiefer als die Serienresonanzfrequenz f_s liegen, erhalten wir eine negative, wirksame Lastkapazität C_{LW} , die Schaltung ist induktiv.

Beispiel 4: Die Schwingquarze wurden für den Betrieb mit einer Lastkapazität $C_L = 20\text{ pF}$ bestellt (und deshalb vom Hersteller mit diesem Wert der Lastkapazität $C_L = 20\text{ pF}$ auf $F_L = 10\,000,00\text{ kHz}$ abgeglichen). - Mit welcher Arbeitsfrequenz f_w schwingt der Oszillator aus Beispiel 2.20.3 ?

Entsprechend Gl.(40) und Gl.(41) erhalten wir:

$$\frac{f_w - f_s}{f_s} - \frac{f_L - f_s}{f_s} = \frac{f_w - f_L}{f_r} = \frac{C_1(C_L - C_w)}{2(C_0 + C_L)(C_0 + C_w)} \quad (57)$$

$$\frac{f_w - f_L}{f_r} = \frac{25 \cdot 10^{-15}(20 - 23) \cdot 10^{-12}}{2(5,5 + 20) \cdot 10^{-12}(5,5 + 23) \cdot 10^{-12}} = -52 \cdot 10^{-6} \quad (58)$$

oder $f_w - f_L = -52 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^6\text{ Hz} = -520\text{ Hz}$

Der Oszillator schwingt mit diesen Quarzen also 520 Hz unter 10,0000 MHz.

Beispiel 5:

Der Hersteller hat die Schwingquarze mit einer Lastkapazität $C_L = 30$ pF abgeglichen. Die Abgleichtoleranz (Auslieferungstoleranz) ist $\pm 50 \cdot 10^{-6}$. Die Ersatzdaten der Quarze wie Beispiele 1- 4. Kann diese Toleranz mit einem Trimmer ausgeglichen werden, mit dem die Gesamtkapazität der Schaltung vom Minimalwert $C_{L2} = 25$ pF bis zum Maximalwert $C_{L1} = 35$ pF variiert werden kann ?

Mit Gleichung (41):

$$LO_1 - LO_2 = C_1 \frac{C_{L2} - C_{L1}}{2(C_0 + C_{L1})(C_0 + C_{L2})} \quad (59)$$

a) $C_{L1} = 30$ pF (Nominalwert)

$C_{L2} = 25$ pF (min. Schaltungskapazität)

$$\frac{\Delta f}{f} = 25 \cdot 10^{-15} \frac{(30 - 25) \cdot 10^{-12}}{2(5,5 + 30) \cdot 10^{-12}(5,5 + 25) \cdot 10^{-12}} = + 57,7 \cdot 10^{-6} \quad (60)$$

b) $C_{L1} = 35$ pF (Nominalwert)

$C_{L2} = 30$ pF (max. Schaltungskapazität)

$$\frac{\Delta f}{f} = 25 \cdot 10^{-15} \frac{(30 - 35) \cdot 10^{-12}}{2(5,5 + 30) \cdot 10^{-12}(5,5 + 35) \cdot 10^{-12}} = - 43,5 \cdot 10^{-6} \quad (61)$$

Die Trimmervariation zum kleinen Wert (25 pF) ist gerade ausreichend, Streuungen der Schaltungskapazitäten können allerdings nicht mehr ausgeglichen werden. Zur oberen Kapazität ist die Trimmervariation zu klein. Quarze der oberen Toleranzgrenze können nicht auf die Sollfrequenz gezogen werden. Etwaige Alterungsbeträge können ebenfalls nicht ausgestimmt werden.

2.21 Verwendete Formelzeichen

a	Formfaktor für AT-Schnitt-Quarze
a, b, c	Konstanten für den Temperaturgang der Frequenz
C_0	statische Kapazität
C_1	dynamische Kapazität
C_E	Kapazität der Elektroden
C_H	Kapazität der Halterung
C_L	Lastkapazität
C_W	wirksame Schaltungskapazität (nicht genormt)
D	Durchmesser des Resonators
d	Dicke des Resonators
d_{ij}	piezoelektrische Konstante
E	Aktivierungsenergie
f	Frequenz
f_a	Antiresonanzfrequenz
f_L	Lastresonanzfrequenz
f_m	Minimalimpedanzfrequenz
f_n	Maximalimpedanzfrequenz
f_p	Parallelresonanzfrequenz
f_r	Resonanzfrequenz
f_s	Serienresonanzfrequenz
f_W	Arbeitsfrequenz (bei Betrieb im Oszillator)
L_1	dynamische Induktivität
LO	Lastresonanzfrequenzoffset = D_L nach DIN-IEC 122
l	Längenabmessung des Resonators
N	Frequenzkonstante (kHz mm)
n	Ordnung des Obertones
PR	Pulling-Range = Ziehbetrug
Q	Schwingungsgüte
R	Boltzmannkonstante
R_1	dynamischer Verlustwiderstand
R_a	Parallelwiderstand
R_{aL}	effektiver Parallelwiderstand
R_L	Lastresonanzwiderstand
R_r	Resonanzwiderstand
r	Kapazitätsverhältnis = C_0/C_1
S	Ziehempfindlichkeit

s_{ij}	elastische Steifigkeit
T, ϑ	Temperatur
T_0	Bezugstemperatur, Temperatur des Umkehrpunktes
t	Zeit in Tagen
X_0	$1/\omega C_0$
ϑ	dielektrische Konstante
η	Viskosität
λ	Wellenlänge
v	Schallgeschwindigkeit
π	3,14
ρ	Dichte des Materials
τ	Dämpfungs-oder Zeitkonstante = $R_1 \cdot C_1$
φ	Phasenwinkel
ω	Kreisfrequenz = $2\pi f$
θ	Schnittwinkel bezogen auf die Z-Achse
ϕ	Schnitt, 2.Drehung um die Z-Achse, bez. auf die X-Achse

2.22 Begriffe

Quarzschnitt

ist die Lage des Quarzelementes zu den kristallographischen Achsen. Der Winkel, unter dem das Quarzelement zu diesen kristallographischen Achsen aus dem Kristall herausgeschnitten wurde, ist der Schnittwinkel.

Elektrode

Auf das Quarzelement aufgebrachte, elektrisch leitende Schicht. Sie dient zur Erzeugung des elektrischen Feldes, das zur Erregung der mechanischen Schwingung erforderlich ist. Üblich ist das Aufbringen durch Aufdampfen oder Sputtern im Vakuum. In speziellen Fällen werden auch Metallelektroden in unmittelbarer Nähe der Resonatoroberfläche angeordnet (elektrodenloser Quarz).

Schwingungsform

Art der mechanischen Schwingung, die bedingt durch den Quarzschnitt, geometrische Formgebung des Quarzelementes und der Elektrodenform und -Anordnung durch das elektrische Wechselfeld erregt wird.

Grundton

niedrigste Frequenz einer Schwingungsform

Obertonquarz

Schwingquarz, der für den Betrieb auf einem Oberton der mechanischen Schwingungsvorgesehen ist. Der Oberton ist ein Vielfaches des Grundtones der Schwingungsform. Die Frequenz des Obertones weicht geringfügig vom genauen Vielfachen der Grundtonfrequenz ab. Deshalb werden Obertonquarze bei der Herstellung auf die genaue Frequenz des gewünschten Obertones abgeglichen.

Ordnung des Obertones n

Zahl, die einem bestimmten Oberton einer vorgegebenen Schwingungsform zugeordnet ist. Der Grundschwingung ist die Zahl 1 zugeordnet. Den harmonischen Obertönen der mechanischen Schwingung sind ganze Zahlen zugeordnet, die in etwa den Frequenzverhältnissen entsprechen (Ausnahme: Biegung und Flächenscherung). Bei der Dickenschersungsschwingung ist eine Erregung der geradzahigen Obertöne nicht möglich.

Ersatzschaltung

Schaltbild, daß das elektrische Verhalten des Schwingquarzes in der Nähe der Resonanz beschreibt. Es besteht aus der Parallelschaltung eines Serienkreises mit der (statischen) Parallelkapazität C_0 . Der Serienkreis beinhaltet L_1 , C_1 , und R_1 . Der Serienzweig wird auch dynamischer Zweig genannt.

statische Parallelkapazität C_0

Kapazität, statisch gemessen zwischen den Anschlüssen des Quarzes. Es ist die Elektrodenkapazität, vermehrt um die Halterkapazität und die Streukapazitäten innerhalb des Quarzgehäuses.

dynamische Kapazität C_1

Kapazität im Serienzweig des Ersatzschaltbildes.

dynamische Induktivität L_1

Induktivität im Serienzweig des Ersatzschaltbildes.

dynamischer Verlustwiderstand R_1

Widerstand im Serienzweig des Ersatzschaltbildes.

Kapazitätsverhältnis r

Verhältnis der statischen Parallelkapazität C_0 zur dyn. Kapazität C_1 :

$$r = C_0/C_1 \quad (62)$$

Serienresonanzfrequenz f_s

Die Eigenfrequenz des verlustlosen Serienkreises. Es ist die Frequenz, für die unter Vernachlässigung von C_0 und R_1 die Reaktanz des Schwingquarzes Null wird:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (63)$$

Parallelresonanzfrequenz f_p

Die Frequenz, für die unter Vernachlässigung von R_1 in der Ersatzschaltung die Reaktanz unendlich wird.

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0} L_1}} \quad (64)$$

Die Parallelresonanz hat für die Bestellung von Schwingquarzen keine Bedeutung.

Resonanzfrequenz f_r :

Die tiefere der beiden Frequenzen, bei denen die Impedanz des Schwingquarzes

reell ist.

Antiresonanzfrequenz f_a :

Die höhere der beiden Frequenzen, bei denen die Impedanz des Schwingquarzes reell wird.

Minimalimpedanzfrequenz f_{zmin} :

Die Frequenz, für die der Betrag der Impedanz des Schwingquarzes ein Minimum wird.

Nennfrequenz f_0 :

Die Frequenz, nach der der Schwingquarz nach einem Datenblatt benannt ist (im allgemeinen die Sollfrequenz).

Die Kennzeichnung erfolgt üblicherweise
bei Grundtonquarzen in kHz und
bei Obertonquarzen in MHz

Arbeitsfrequenz f_w

Die Frequenz, die durch das Zusammenwirken von Oszillatorschaltung und Schwingquarz erzeugt wird.

Lastresonanzfrequenz f_L :

Die Frequenz, bei der unter festgelegten äußeren Bedingungen die Impedanz einschließlich einer Lastkapazität reell wird. Diese Lastkapazität kann in Serie oder parallel zum Schwingquarz liegen, oder eine Kombination aus beiden sein.

Güte Q

Schwingungsgüte des Serienzweiges:

$$Q = \frac{2\pi f_s L_1}{R_1} = \frac{1}{2\pi f_s C_1 R_1} \quad (65)$$

Parallelgüte M

$$M = \frac{Q}{r} = \frac{1}{2\pi f_s C_0 R_1} \quad (66)$$

Resonanzwiderstand R_r :

Widerstand des Schwingquarzes bei der Resonanzfrequenz f_r .

Parallelwiderstand R_a :

Widerstand des Schwingquarzes bei der Antiresonanzfrequenz f_a .

Lastresonanzwiderstand R_L :

Widerstand des Schwingquarzes mit einer in Serie geschalteten, externen Kapazität C_L bei der Lastresonanzfrequenz f_L :

$$R_L = R_r \left(1 + \frac{C_0}{C_L}\right)^2 \quad (67)$$

Bei der Messung von R_L verfälschen Streukapazitäten oft das Ergebnis.

effektiver Parallelwiderstand R_{aL} , (ERR, PI)

Der Scheinwiderstand der Kombination des Schwingquarzes mit einer parallel liegenden Kapazität C_L , bei der die Impedanz hochohmig reell ist:

$$R_{aL} = \frac{1}{R_1 4 \pi^2 f^2 (C_0 + C_L)^2} \quad (68)$$

Lastkapazität C_L :

Wirksame externe Kapazität, die zusammen mit dem Schwingquarz die Lastresonanzfrequenz f_L bestimmt. Hierbei ist es gleichgültig, ob die externe Kapazität C_L in Serie oder parallel zum Quarz liegt.

Lastresonanzoffset LO: (relativer LO) = D_L nach DIN-IEC 122

relative Differenz zwischen der Lastresonanzfrequenz f_L und der Resonanzfrequenz f_r :

$$LO = \frac{f_L - f_r}{f_r} = \frac{\Delta f_L}{f_r} = \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \quad (69)$$

Lastresonanzfrequenzoffset Δf_L (neue Definition: absoluter LO)

Differenz zwischen Lastresonanzfrequenz und Resonanzfrequenz:

$$\Delta f_L = f_L - f_r \quad (70)$$

Ziehbereich PR (relativ.Ziehbereich) = $D_{L1, L2}$ nach DIN-IEC 122

Relative Frequenzänderung zwischen zwei Lastkapazitäten (Trimmerstellungen)

$$\Delta f_L \approx f_r \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \quad (71)$$

C_{L1} und C_{L2} : (PR wird üblich in 10^{-6} angegeben)

$$PR = LO_2 - LO_1 = C_1 \frac{C_{L2} - C_{L1}}{2(C_0 + C_{L1})(C_0 + C_{L2})} \quad (72)$$

Ziehbereich $\Delta f_{L1; L2}$ (neuere Definition: absoluter Ziehbetrag)

Differenz zwischen zwei Lastresonanzfrequenzen bei den zugehörigen,

$$\Delta f_{L1; L2} = |f_{L1} - f_{L2}| \quad (73)$$

spezifizierten Lastkapazitäten C_{L1} und C_{L2} : (übliche Angabe in kHz)

$$\Delta f_{L1; L2} \approx \left| f_r \frac{C_1(C_{L2} - C_{L1})}{2(C_0 + C_{L1})(C_0 + C_{L2})} \right| \quad (74)$$

Ziehempfindlichkeit ζ (Pulling sensitivity)

Differentialquotient der Lastresonanzfrequenz zur Lastkapazität bei einer festgelegten Lastkapazität C_L : (übliche Angabe in Hz/pF)

$$\zeta \approx -f_r \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)^2} \quad (75)$$

relative Ziehempfindlichkeit S

Differentialquotient Lastresonanzfrequenz zur Lastkapazität bezogen auf die Resonanzfrequenz: (übliche Angabe in 10^{-6})

$$S \approx -\frac{C_1}{2(C_0 + C_L)^2} \quad (76)$$

Belastung P_c

Die im Schwingquarz umgesetzte elektrische Verlustleistung. Es ist auch gebräuchlich, die Quarzspannung U_c oder den Quarzstrom I_c als Belastung anzugeben.

Bezugsbelastung P_B :

Belastung, auf die sich die Angaben (spezifizierten Werte) beziehen.

Nebenresonanz :

Weitere Resonanz, die neben der gewünschten Resonanz liegt (auch Nebenwelle).

Relativer Nebenresonanzwiderstand :

Verhältnis des Nebenresonanzwiderstandes zum Widerstand der Hauptwelle.

$$R_{N\,rel} = \frac{R_N}{R_r} \quad (77)$$

Alterung:

Abhängigkeit der Quarzparameter, insbesondere der Frequenz von der Zeit.

Abgleichtoleranz:

Größte zulässige Abweichung der Ist-Frequenz von der Sollfrequenz unter definierten Betriebsbedingungen. Zu den zu definierenden Betriebsbedingungen gehören die Bezugstemperatur, Quarzbelastung, Lastkapazität ggf. das Meßverfahren.

Zulässiger Temperaturgang der Frequenz.

Zugelassene Abweichung der Resonanzfrequenz (oder Lastresonanzfrequenz) im Arbeitstemperaturbereich, bezogen auf die Bezugsfrequenz.

Belastungsabhängigkeit:

Änderung von Parametern durch die Änderung der Quarzbelastung, oder deren Abweichung von einem festgelegtem Bezugswert. Die Parameter können die Frequenz oder die Ersatzdaten sein. Siehe auch DLD.

DLD Drive Level Dependence of resonance resistance:

Abweichung des Resonanzwiderstandes, die durch eine Änderung der Quarzbelastung bedingt ist.

Arbeitstemperaturbereich ϑ_w :

Temperaturbereich, in dem die Eigenschaften innerhalb der Toleranzen liegen, die im Datenblatt (Spezifikation) vorgegeben sind. Unter Temperatur werden hierbei die am Gehäuse gemessenen Temperaturen verstanden.

Temperaturbereich der Betriebsfähigkeit ϑ_u :

Temperaturbereich (am Schwingquarzgehäuse gemessen), in dem der Schwingquarz funktionsfähig sein muß, jedoch nicht alle seine Eigenschaften innerhalb der Toleranzen liegen müssen.

Temperaturbereich der Transport und Lagerfähigkeit:

Temperaturbereich, dem der Schwingquarz während des Transportes oder der Lagerung beliebig lange ausgesetzt werden darf, ohne dauernden Schaden zu nehmen.

Temperaturkoeffizient der Resonanzfrequenz TK_f :

Differentialquotient der Resonanzfrequenz zur Temperatur.

$$TK_f = \frac{\delta f}{\delta \vartheta} \quad (78)$$

Der Temperaturkoeffizient kann nur für eine, zu spezifizierende Temperatur angegeben werden.

Null-Koeffizient-Temperatur ϑ_0 (Umkehrpunkt-Temperatur)

Diejenige Temperatur, bei der der Temperaturkoeffizient TK_f der Resonanzfrequenz durch Null geht.

Bezugstemperatur:

Diejenige Temperatur, auf die bestimmte spezifizierte Daten bezogen werden und bei der die entsprechenden Messungen durchgeführt werden.

Im allgemeinen ist die Bezugstemperatur $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$. Bei Schwingquarzen für Thermostatbetrieb ist die Bezugstemperatur die mittlere Thermostatterperatur.

2.23 Literatur

1. Heising, R. A.
Quartz Crystals for Electrical Circuits
D. van Nostrand Comp. Inc. New York, 1952
2. Cady, W.
Piezoelectricity,
Volume One Dover Publications, Inc. New York, 1964
3. Herzog
Siebschaltungen mit Schwingkristallen
Friedrich Vieweg u.Sohn, Braunschweig, 1962
- 4: DKE
DIN 45 100 Schwingquarze, Begriffe Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1981
DIN IEC 122, Teil 1, Schwingquarze zur Frequenzstabilisierung und
-Selektion,
Normwerte und Prüfbedingungen
DIN IEC122, Teil 2, Schwingquarze zur Taktversorgung von Mikropro
zessoren
5. Buchanan, J. P.
Handbook of Piezoelectric Crystals for Radio Equipment Designers Wright
Air Development Center, US Air Force, Wright-Patterson Air Force Base Ohio
Carpenter Litho & Prtg. C, Sptingfield, 0
6. Warner, Fraser
Fundamental Studies of Ageing in Quartz und Stockbridge Resonators
Proc. CIC Lausanne 1964
7. Truffert
Le Vieillissement des Oszillators Annal. Franc. de Chronometrie et d.
Micromech, 1972
8. Neubig, Bernd
Schwingquarze in der Oszillatorschaltung, Vortrag Quarzsymposium von DKE
und ZVEI, Frankfurt (1985), und Schwingquarze, Vistas-Verlag 1985

Temperaturabhängigkeit:

9. Chi, A.R.
Frequency Temperature Behavior of AT-Cut Quartz Rersonators.
10 th.Annual Symposium on Frequency Control
US Army Electronic Command, Ft. Monmouth, NJ
National Technical Information Center, Springfield NJ.

10. D.L.Hammond, C.A.Adams and A.Benjaminson
Hysteresis Effects in Quartz Resonators
Frequency Technology, Jan.1969 S.19
11. G.Theobald, G.Marianneau, R.Pretot, J.J.Gagnepain
Dynamic Thermal Behavior of Quartz Resonators
3 th Annual Symposium on Frequency Control
US Army Electronic Command, Ft. Monmouth, NJ.

Kurzzeitstabilität:

12. J.J.Gagnepain, J.Uebersfeld, G.Giujon
Relation between $1/f$ Noise and Q-Factor in Quartzresonators at Roomm
and Low-Temperatures, First Theoretical Interpretation.
Proc. 35th Ann. Freq. Control Symposium (1981)

Monolithische Filter:

R.A.Sykes und W.D.Beawer
High Frequency Monolithic Crystal Filters
Frequency, May-June (1966) S.42

Anhang A

Checkliste zur Aufstellung einer Spezifikation

a) Notwendige Anforderungen:

Kennwerte:

Schwingquarzgehäuse

Nennfrequenz (f_Q) Oberton

Kennzeichnung

Betriebsbedingungen:

Lastkapazität (C_L)

Bezugstemperatur

Arbeitstemperaturbereich

Bezugsbelastung (P_B) (Quarznennbelastung)

Toleranzen: (Abweichungsgrenzen)

Frequenztoleranz bei der Bezugstemperatur

zulässige Frequenzabweichung im Arbeitstemperaturbereich,

bezogen auf die Frequenz bei der Bezugstemperatur

Größtwert des Resonanzwiderstandes (R_r)

ggf. des Lastresonanzwiderstandes (R_L)

b) Weitere Anforderungen, wenn erforderlich:

Elektrische Anforderungen:

statische Parallelkapazität (C_0)

dynamische Kapazität (C_1)

Ziehbereich (PR)

Nebenresonanzen

Alterung

Grenzbelastbarkeit

Belastungsabhängigkeit (DLD)

c) mechanische und klimatische Belastungen:

Lötbarkeit der Anschlüsse

Dichtheit des Gehäuses

Temperaturbereich der Lagerfähigkeit

Schockbelastung

Schwingen (Schütteln)

rasche Temperaturwechsel

Trockene Wärme

Feuchte Wärme

Anhang B

Temperaturgänge von Dickenschersungsschwingern

Temperaturgang AT-Schnitt D/d 60, nach A.R.CHI:

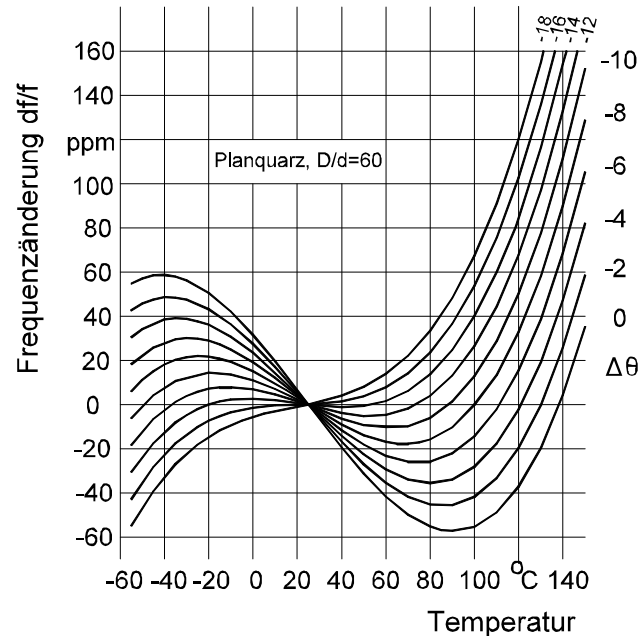


Bild 2.77 Temperaturgang AT-Schnitt-Quarz D/d = 60

Temperaturgang AT-Schnitt D/d=20 (Linsenquarze):

Bei relativ dicken Quarzresonatoren, also auch bei linsenförmigen Quarzresonatoren liegt die Temperatur des Wendepunktes höher. Soll die Temperaturabhängigkeit wieder auf die Temperatur $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$ bezogen werden, ergibt sich eine neue Kurvenschar, zum Beispiel nach Bild 2.78:

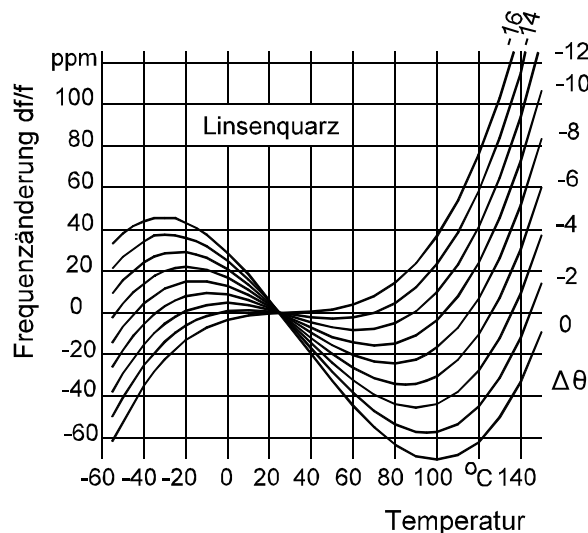


Bild 2.78 Temperaturgang für relativ dicke AT-Quarze

Temperaturgang AT-Schnitt $n \cdot D/d > 90$ (Obertonquarze):

Entsprechend Abschnitt 2.12.2 erhalten wir auch für relativ dünne Resonatoren ($n \cdot D/d > 90$) eine andere Kurvenschar. Weitere Einflüsse auf den Temperaturverlauf können die Halterung und die Einbaurichtung haben. Bei sehr hohen Ansprüchen an einen bestimmten Temperaturverlauf ist der Hersteller zu befragen.

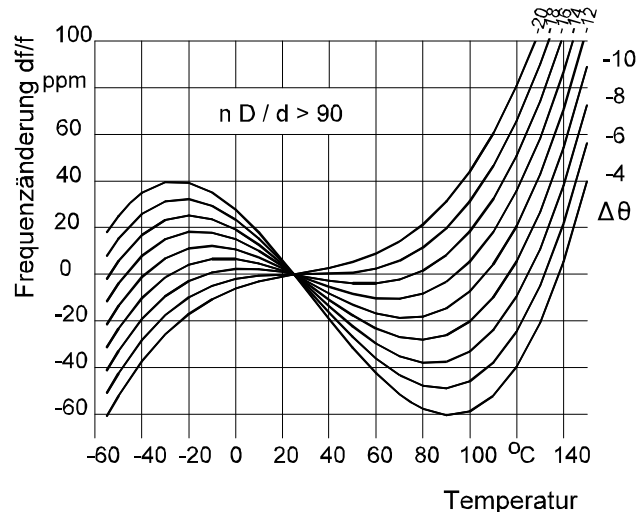


Bild 2.79 Temperaturgang von AT-Quarzen $D/d \geq 90$

Temperaturgang SC-Schnitt:

Der SC-Schnitt, ein spezieller Schnitt für Thermostatanwendungen, hat seinen Wendepunkt bei der Temperatur 95°C . Der Kurvenverlauf in der Nähe des Wendepunktes ist geringfügig flacher als beim AT-Schnitt, dafür wird der Temperaturkoeffizient im weiteren Abstand vom Wendepunkt steiler. Entsprechend dieser Eigenschaft und der daraus resultierenden Anwendung wird nur der eine Schnittwinkel mit dem $\text{TK}_w = 0$ verwendet (hervorgehobene Kurve). Die Stressempfindlichkeit des SC-Schnittes beträgt in der ungünstigsten Achsrichtung 70% des AT-Schnittes, entsprechend kürzer sind die Wiedereinlaufzeiten nach Temperaturwechseln.

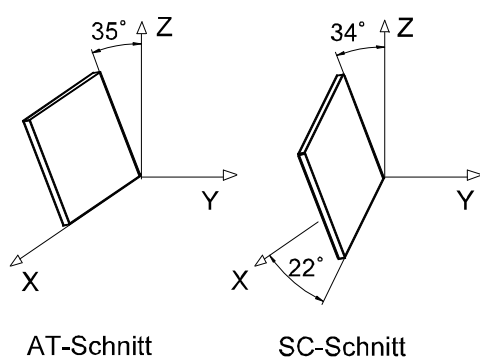


Bild 2.80 SC-Schnitt

Anhang C

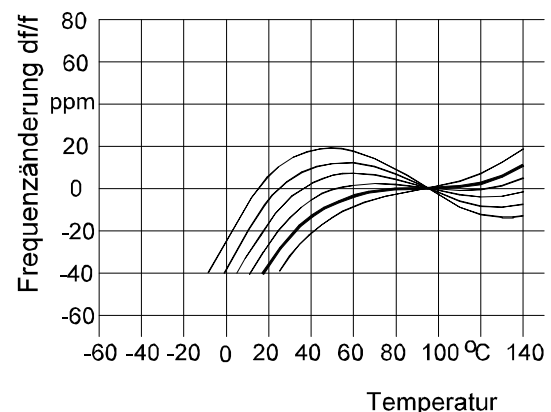


Bild 2.81 Temperaturgang SC-Schnitt

Resonanzwiderstände und dynamische Kapazitäten von AT-Schnitt-Quarzen in den Gehäusen der Standardgrößen HC-49/U und HC-51/U:

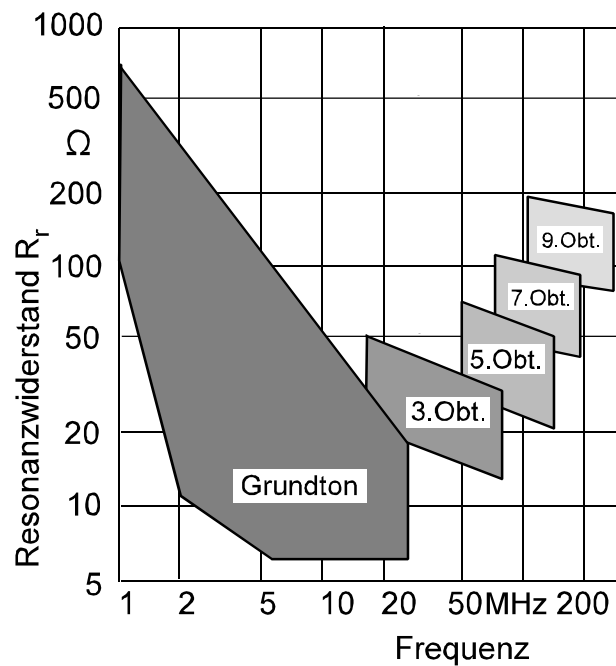


Bild 2.82 Resonanzwiderstand R_r von AT-Schnitt-Quarzen

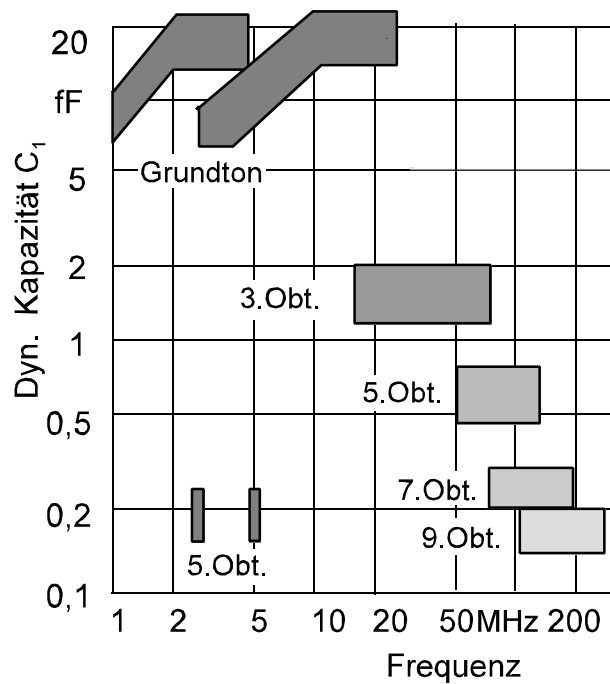


Bild 2.83 dyn. Kapazität C_1 von AT-Schnitt-Quarzen