

## 1. Technische Einführung

Die Gebrüder Curie entdeckten bei ihren Untersuchungen an Kristallen, daß mechanische Beanspruchungen an Quarzkristallen elektrische Ladungen erzeugen. Diese Erscheinung wurde – abgeleitet aus dem Griechischen piezein = drücken – Piezoeffekt genannt.

Umgekehrt wird durch Anlegen eines elektrischen Feldes der Quarzkristall deformiert, d.h. bei einem Wechselfeld zu mechanischen Schwingungen angeregt.

Der Quarzkristall verhält sich wie ein elektrischer Resonanzkreis mit sehr geringer Dämpfung.

## 2. Quarzmaterial

Der Quarz besteht aus Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$ .

Obwohl 14% der Erdoberfläche aus  $\text{SiO}_2$  besteht, kommt es in kristalliner Form und in der entsprechenden Reinheit verhältnismäßig selten vor. Rohquarz in guter Qualität für die Schwingquarzherstellung wird in Brasilien gefunden.

Deshalb begann man schon sehr frühzeitig damit, Quarzmaterial synthetisch herzustellen, zu züchten.

In Stahlautoklaven wird bei ca.  $400^\circ\text{C}$  und hohem Druck von  $10000\text{ N/cm}^2$  Quarzbruch in alkalischer Lösung gelöst und an vororientierten Quarzkeimplatten die gewünschte Wachstumsrichtung erzwungen.

Die Wachstumsgeschwindigkeit liegt bei ungefähr  $1\text{ mm/Tag}$ , wobei langsames Wachstum ein homogeneres Material ergibt, da weniger Fremdatomer im Kristallgitter eingebaut werden.

Der synthetische Quarz wird in Länge und Querschnitt gleich so gezüchtet, daß die nachfolgenden Arbeitsgänge optimal mit geringsten Schnittverlusten durchgeführt werden können. Die heute angebotene Qualität ist von höchster Reinheit und Güte, so daß bei der Schwingquarzherstellung fast ausschließlich synthetischer Quarz eingesetzt wird.

## 1. Technical Introduction

In their investigations, the brothers Pierre & Jacques Curie found that electrical charges were produced by mechanical stresses applied to various naturally occurring crystals. This phenomenon is called the 'piezo-electric effect', being derived from the Greek word 'to press'.

Conversely it was found that the crystal was deformed by the application of an electrical charge, later the application of an alternating electrical field introduced mechanical vibrations.

The quartz crystal behaves as an electrical resonance circuit with very low attenuation.

## 2. Quartz

Quartz was found to be one of the naturally occurring crystalline substance that exhibited the 'piezo-electric effect' and being very stable, both chemically and mechanically, it became of great interest to the early electronic experimenters. The chemical description of Quartz is Silicon dioxide  $\text{SiO}_2$ .

Although approximately 14% of the earth's crust consists of  $\text{SiO}_2$ , it occurs relatively infrequently in usable crystalline form with the necessary purity and without physical defects, cracks etc. Raw quartz of quality suitable for the production of quartz crystal units is found in Brazil and Madagascar.

For this reason continuous attempts have been made to produce quartz synthetically; that is to grow by recrystallisation on to quartz seed plates. These processes are now commercially successful.

Quartz chippings are dissolved in an alkaline solution in steel autoclaves at approximately  $400^\circ\text{C}$  and a pressure of  $10.000\text{ N/cm}^2$ , the desired direction of growth is ensured by the careful preorientation of the quartz seed plates.

The growth rate is normally approximately  $1\text{ mm/day}$ . Slow growth-rates result in a more homogeneous material since fewer foreign atoms are being incorporated into the crystal lattice.

## 1. Introduction technique

Ce sont les frères Curie qui, en étudiant les propriétés des cristaux, découvrirent que la pression appliquée sur un cristal génère une charge électrique. Ce phénomène fut appelé "effet piézoélectrique", du grec "piezein" qui signifie presser.

Inversement, l'application d'un champ électrique provoque la déformation d'un cristal de quartz qui se comporte alors comme un circuit électronique résonnant avec un très faible amortissement.

## 2. Composition du quartz

Le quartz est composé d'oxyde de silicium  $\text{SiO}_2$  qui constitue 14% de la croûte terrestre. Cependant, le quartz de haute pureté nécessaire à l'électronique ne se rencontre que rarement dans la nature (Brésil et Madagascar par exemple).

On a donc cherché à produire des cristaux synthétiques dont l'emploi est maintenant quasi généralisé dans l'industrie.

La synthèse s'effectue en autoclave dans laquelle une solution alcaline de fragments de quartz naturel est portée à environ  $400^\circ\text{C}$ , sous une pression de  $10000\text{ N/cm}^2$ . Le quartz se recrystallise autour de "germes", avec une vitesse de croissance d'environ  $1\text{ mm/jour}$ . Il est produit à la longueur et à la section désirées, de façon à réduire au maximum les pertes de matière en cours de fabrication.

Une croissance lente favorise l'homocristal car moins d'atomes étrangers sont inclus dans la maille du cristal.

La qualité des cristaux disponibles sur le marché est telle que pratiquement toute l'industrie du quartz utilise le matériau synthétique.



### 3. AT-Schnitt

Die hervorragenden physikalischen Eigenschaften haben den AT-Schnitt zum gebräuchlichsten Quarschnitt bei der Schwingquarzherstellung werden lassen.

Die Schnittlage des AT-Schnittes zu den Kristallachsen ist aus der schematischen Darstellung eines halben Quarkristalles ersichtlich (s. Abb. 1).

Synthetic quartz is now grown in suitable length and cross sections to enable the subsequent processing steps to be carried out in the most efficient way, with minimum cutting losses. Grades available today are of very high purity and mechanical quality, so that synthetic quartz is used almost exclusively for the production of quartz crystal units.

### 3. AT-cut

Its outstanding physical properties have made the AT-cut the most used cut for oscillator crystal production.

The position of the AT-cut relative to the crystal axis can be seen from the marginal schematic presentation of a half quartz crystal (fig. 1).

### 3. Coupe AT

Cette coupe est la plus répandue dans le domaine de l'électronique en raison de ses caractéristiques physiques remarquables.

Son orientation par rapport aux axes du cristal est indiquée dans le schéma ci-dessous.

Abb. 1/fig. 1

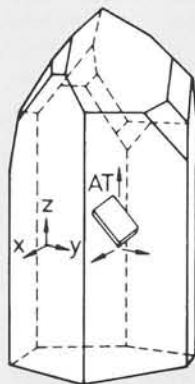
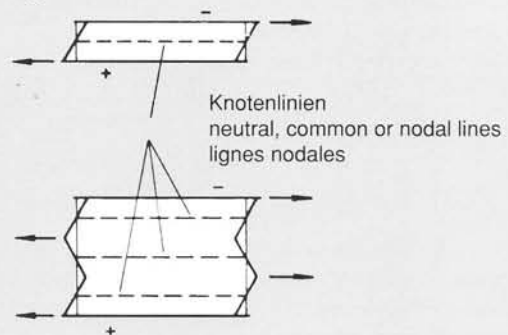


Abb. 2/fig. 2



Üblicherweise werden Schwingquarze im AT-Schnitt im Frequenzbereich 800 kHz bis 360 MHz hergestellt, wobei die Grundschnwingungen von 800 kHz bis 40 MHz und die Obertonschnwingungen von 10 MHz bis 360 MHz eingesetzt werden.

Quarze im AT-Schnitt sind Dicken-schnwingler. Der Quarschnwingler ist meistens eine runde Scheibe. Die Dicke der Scheibe ist frequenzbestimmend mit

$$f [\text{kHz}] = \frac{N}{d [\text{mm}]}$$

N ist die Frequenzkonstante; für den AT-Schnitt ist  $N = 1660 \text{ kHz} \cdot \text{mm}$ .

Der Quarschnwingler erhält beidseitig im Hochvakuum eine dünne Metallelektrode aufgedampft, über die ein elektrisches Wechselfeld angelegt wird und den Quarschnwingler zur mechanischen Schnwingung anregt.

Usually, oscillator crystals in the AT-cut are manufactured in the frequency range 800 kHz to 360 MHz, from 800 kHz to 40 MHz in fundamental mode and from 10 MHz to 360 MHz overtone mode oscillations are employed.

AT-cut crystals are thickness shear vibrators. The crystal vibrator is usually a round disc. The thickness (d) of the disc is related to the fundamental mode frequency f by the equation:

$$f [\text{kHz}] = \frac{N}{d [\text{mm}]}$$

The constant for the AT-cut is  $N = 1660 \text{ kHz} \cdot \text{mm}$ .

The crystal vibrator has thin metal electrodes deposited on both sides by evaporation, these electrodes are the means whereby the alternating electric field is applied thus stimulating the mechanical oscillation.

On l'emploie généralement entre 800 Hz et 360 MHz: de 800 kHz à 40 MHz en mode fondamental et de 10 MHz à 360 MHz sur les divers modes partiels ou overtone.

Cette coupe fait travailler la lamelle de quartz en cisaillement d'épaisseur; le résonateur est le plus souvent une lamelle circulaire dont l'épaisseur détermine la fréquence:

$$f [\text{kHz}] = \frac{N}{d [\text{mm}]}$$

ou N, la constante de fréquence, vaut pour la coupe AT 1660 kHz · mm. Deux très minces électrodes métalliques sont déposées sous vide sur les deux faces du résonateur auquel elles permettent d'appliquer un champ électrique alternatif engendrant une vibration mécanique.

Bei Obertonschwingung können nur ungeradzahlige Harmonische erregt werden, wie aus der Polaritätsbetrachtung (Abb. 2) ersichtlich ist. Bei einer geradzahligen Oberwelle würden die Elektroden gleiche Polarität aufweisen und somit kein elektrisches Feld zur mechanischen Schwingungsanregung entstehen.

Gebräuchliche Obertonschwingungen sind der 3., 5., 7. und 9. Oberton, wobei die Obertonschwingung nicht exakt ein ganzzahliges Vielfaches der Quarzgrundfrequenz ist, sondern von dieser bis zu einigen Prozent abweichen kann.

Der AT-Schnitt zeichnet sich gegenüber anderen Quarzschnitten durch die geringe Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz aus. Sie folgt einer Gleichung 3. Grades (Abb. 3) und beschreibt eine sogenannte kubische Parabel mit einem Wendepunkt je nach Quarzform und Frequenz bei 25° bis 35° C.

With overtone oscillation, only odd-numbered harmonics can be generated, as can be seen from the polarity diagram (fig. 2). With an even-numbered overtone, the electrodes would show identical polarity and consequently no electric field will develop for the stimulation of mechanical oscillation.

Normal overtone oscillations are the 3rd, 5th, 7th and 9th, the upper harmonic oscillation is not exactly an integral multiple of the crystal fundamental frequency but can differ from this up to some percents.

The principal advantage of AT-cut over other cuts is the low frequency sensitivity to change in temperature, it follows a 3rd degree curve, a so-called "cubical parabola" with an inflection point which lies between 25° and 35° C depending on the actual cut angle and mechanical construction.

Pour les modes partiels, seuls les rangs impairs peuvent être excités, pour des raisons de polarités (voir fig. 2). Pour les rangs pairs en effet, les deux électrodes auraient même polarité et aucune vibration mécanique n'en résulterait.

Les harmoniques les plus usitées sont les 3ème, 5ème, 7ème et 9ème. Il faut toutefois remarquer que les fréquences obtenues ne sont pas les multiples exacts de la fréquence du mode fondamental: la différence atteint quelques pourcents.

L'avantage principal de la coupe AT par rapport aux autres coupes est la faible sensibilité de la fréquence aux variations de température. La fonction mathématique qui les relie est du 3ème degré; c'est une "parabole cubique" (fig. 3) dont le point d'inversion se situe, suivant la forme du quartz et sa fréquence, entre + 25° et + 35° C.

$$\frac{\Delta f}{f} = A_1 \cdot (T - T_{ref}) + A_2 \cdot (T - T_{ref})^2 + A_3 \cdot (T - T_{ref})^3$$

Diese Gleichung läßt sich vereinfachen, wenn man sie statt auf die Bezugstemperatur  $T_{ref}$  auf die Wendepunkt-Temperatur  $T_{inv}$  bezieht:

This equation can be reduced, if one refers to the inflection point temperature  $T_{inv}$  instead of the initial temperature  $T_{ref}$ .

On peut simplifier cette équation en substituant à la température de référence  $T_{ref}$  la température du point d'inversion  $T_{inv}$ :

$$\frac{\Delta f}{f} = a_1 \cdot (T - T_{inv}) + a_3 \cdot (T - T_{inv})^3$$

wobei / whereby / avec  $a_3 = 1,05 \cdot 10^{-4}$

$$a_1 = 0,0085 \cdot \Delta\varphi$$

$\Delta\varphi = \varphi_{zz} - \varphi_0$  in Winkelminuten / in one-sixtieth of one angular degree / en minutes d'angle

$\frac{\Delta f}{f}$  in ppm [ $= 10^{-6}$ ] und Temperaturen in °C / and temperatures in °C / et les températures en °C

Die Steigung im Wendepunkt wird durch den Schnittwinkel  $\varphi_{zz}$  bestimmt.  $\Delta\varphi$  ist die Schnittwinkeldifferenz zum sogenannten Nullwinkel  $\varphi_0$ , bei dem die TK-Kurve eine horizontale Wendetangente besitzt ( $\Delta\varphi = 0$  in Abb. 3).

Bei entsprechender Wahl des Schnittwinkels entstehen zwei sogenannte Umkehrpunkte, und zwar ein Maximum unterhalb und ein Minimum bei Temperaturen oberhalb  $T_{inv}$ . Im Um-

The steepness at the inversion point depends on the angle of cut is the difference in cut angle between the so called zero angle where the T.K. curve has a horizontal tangent at the inflection point.

By the choice of the appropriate cutting angle, two inversion points appear in the T.K. curve, a maximum below 25° C and a minimum above this temperature. At each of these inversion

La pente au point d'inversion dépend de l'angle de coupe  $\varphi_{zz}$ .  $\Delta\varphi$  est l'écart angulaire avec l'angle  $\varphi_{zz}$ , pour lequel la courbe de dérive en fonction de la température possède au point d'inflexion une tangente horizontale ( $\Delta\varphi = 0$  sur fig. 3).

En choisissant convenablement l'angle de coupe, on fait apparaître deux points d'inversion: un maximum en-dessous de + 25° C et un minimum au-



kehrpunkt ist der Temperaturkoeffizient Null. Dies wird bei Thermostatschwingquarzen ausgenutzt, indem durch geeignete Wahl des Schnittwinkels Umkehrpunkt (Minimum) und Thermostatentemperatur zusammenfallen. Deshalb muß beim Schwingquarz für Thermostatenbetrieb immer die gewünschte Thermostatentemperatur angegeben werden.

Aus Abb. 3 ist ersichtlich, daß möglichst symmetrische Temperaturbereiche bezogen auf den Wendepunkt, wie z.B.  $-20^{\circ}$  bis  $+70^{\circ}$  C oder  $0^{\circ}$  bis  $+50^{\circ}$  C sinnvoll sind. Eine einseitige Begrenzung wie z. B. bei  $0^{\circ}$  bis  $+70^{\circ}$  C bedeutet für den Hersteller im allgemeinen keine Erleichterung, da aufgrund des symmetrischen Verlaufs die vorgegebene Toleranz - in unserem Fall bis  $-20^{\circ}$  C - nur mit entgegengesetztem Vorzeichen eingehalten wird.

points the temperature gradient is zero.

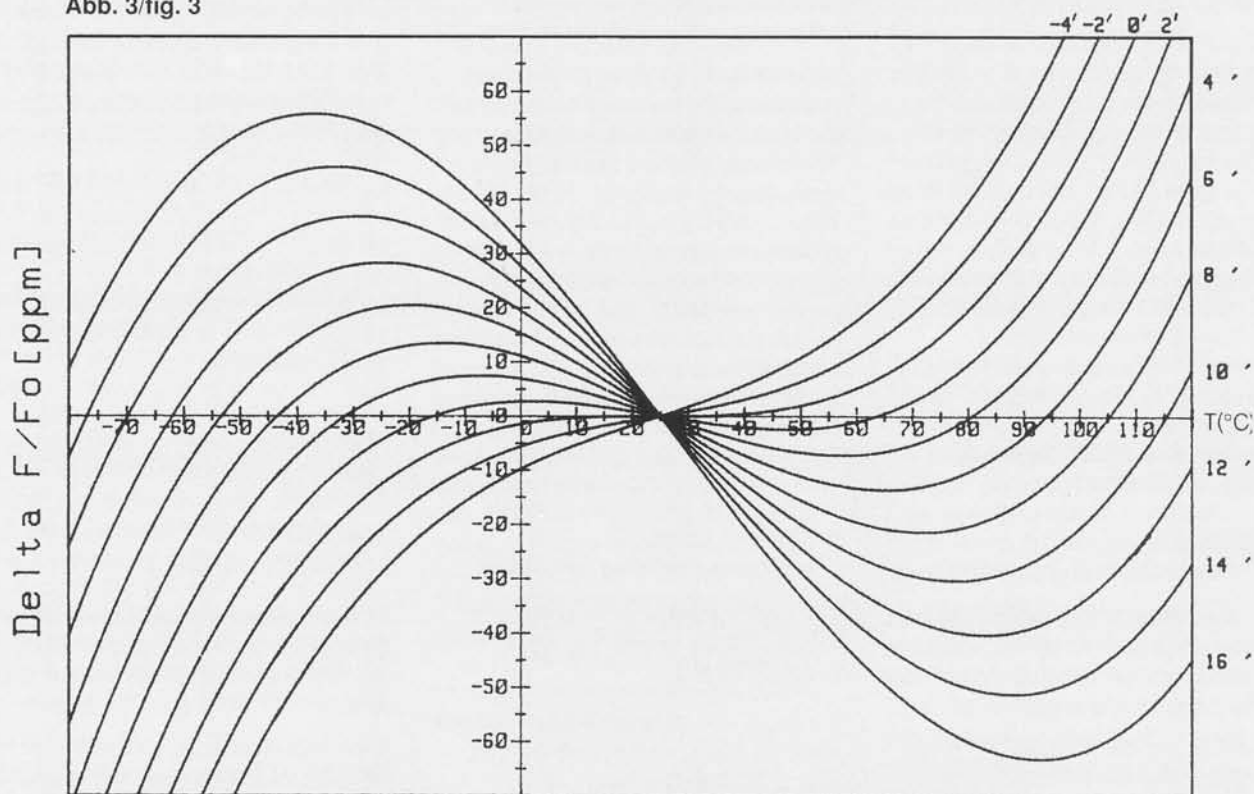
This property is, at the upper inversion point, utilised where crystals are operating in a thermostatically controlled environment (oven), judicious choice of the cutting angle will cause the zero temperature gradient point to coincide with the thermostat temperature, thus the thermostat or oven temperature must be clearly stated when ordering crystals for this particular use.

From fig 3 it can be seen that symmetrical ranges of temperature with respect to the inflection point, e.g.  $-20^{\circ}$  C to  $+70^{\circ}$  C or  $0^{\circ}$  C to  $+50^{\circ}$  C are meaningful. A one-sided limitation, such as e.g. at  $0^{\circ}$  to  $+70^{\circ}$  C means no relief for the manufacturer in general, due to the symmetry of the curves the suggested tolerance - in our case down to  $-20^{\circ}$  C - is only observed with opposite (plus or minus) signs.

dessus de cette température. A chaque point d'inversion, le coefficient de température est nul; cette propriété est utilisée pour réaliser des quartz fonctionnant en enceinte thermostatée: un choix judicieux de l'angle de coupe fait coïncider le point d'inversion "chaud" avec la température de l'enceinte. C'est pourquoi il est indispensable de nous communiquer cette donnée lorsque vous commandez ce type de quartz.

La fig. 3 montre bien que l'utilisateur doit s'efforcer de choisir une plage de fonctionnement centrée par rapport au point d'inflexion:  $-20^{\circ}$  C à  $+70^{\circ}$  C ou  $0^{\circ}$  C à  $+50^{\circ}$  C par exemple. Une plage asymétrique telle que  $0^{\circ}$  C à  $+70^{\circ}$  C n'apporte aucune facilité de réalisation car elle suppose en fait que la tolérance prescrite est tenue entre  $-20^{\circ}$  C et  $+70^{\circ}$  C.

Abb. 3/fig. 3



Temperaturgang der Frequenz / temperature characteristics / stabilité en température



Die Schnittwinkel können auf etwa 10 Winkelsekunden genau eingehalten werden. Da auch Randeinflüsse usw. den Temperaturlauf etwas beeinflussen, sind der Minimierung der Frequenzänderung in einem Temperaturbereich neben den physikalischen auch technische Grenzen gesetzt.

Zur Bestimmung des Temperaturgangs der Frequenz ist für einfachere Anforderungen ausreichend, die Frequenzen bei drei Temperaturen zu messen.

Für höhere Genauigkeit sind fünf Meßpunkte oder mehr erforderlich. Durch diese wird die best angepaßte kubische Parabel gelegt, und die zugehörigen Koeffizienten bestimmt. Bei einem regulären Verlauf sollte der so ermittelte Wert für  $a_3$  auf  $\pm 20\%$  mit dem oben angegebenen übereinstimmen. Bei weiteren Temperaturbereichen kann die Genauigkeit der Beschreibung der TK-Kurve durch Hinzufügen eines Terms 4. Ordnung in die Gleichung auf Seite 8 erhöht werden.

Temperaturmeßquarze besitzen eine stark ausgeprägte Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz. Die Kennlinie des von TELE QUARZ als QT-Schnitt bezeichneten Temperaturmeßquarzes ist im Temperaturbereich von  $-40^\circ\text{C}$  bis  $+150^\circ\text{C}$  annähernd geradlinig.

Der lineare Koeffizient ist vom Design abhängig und kann typisch mit 90 ppm/K angegeben werden.

Der quadratische Koeffizient beträgt 0.08 ppm/K<sup>2</sup>.

Wegen der kleinen thermischen Zeitkonstante wird der Gehäusotyp HC-52/U verwendet.

#### 4. Gehäuse, Stromverschweißungstechnik

Der Quarzvibrator wird in dämpfungsarmen Haltersystemen (Abb. 4a) montiert, um die hohe Schwingungsgüte zu erhalten.

Die Zuführung der elektrischen Energie erfolgt über die Halterung und die dünnen, aufgedampften Metallelektroden.

Für höhere mechanische Beanspruchungen, insbesondere Schock- und Vibrationsfestigkeit, sind besondere Montagearten mit Drei- und Vierpunkt-

Cutting angles of approximately 10 arc seconds can be accurately maintained, however other mechanical effects can influence the variation of frequency over the temperature range, thus technical as well as physical limitations are imposed on minimizing the temperature coefficient.

For the determination of the frequency temperature coefficient it is sufficient - for simple requirements - to measure the frequencies at three temperatures. For higher accuracy, five measuring points or more may be necessary. -By means of these, the best adapted cubical parabola is applied and the appropriate coefficients  $a_1$ , and  $a_3$  determined.

A correctly designed resonator should produce a smooth curve for its temperature coefficient with the value of  $a_3$  within  $\pm 20\%$  of the value indicated above.

In the case of other temperature ranges, the accuracy of the T.K. curve can be increased by adding a 4th-order term in the equation on Page 8.

Thermometric quartz crystals have a very strong temperature dependence of the resonance frequency. The characteristic of the thermometric quartz crystal, designated QT cut by TELE QUARZ, is approximately linear in the temperature range  $-40^\circ\text{C}$  to  $+150^\circ\text{C}$ . The linear coefficient is dependent on design and can be specified as typically 90 ppm/K. The square-law coefficient is 0.08 ppm/K<sup>2</sup>. Enclosure type HC-52/U is used owing to the low thermal time constant.

#### 4. Encapsulation, resistance welding technique

The quartz vibrator is mounted in a lowloss holder system (fig. 4a) in order to obtain high Q.

Electrical energy is applied to the resonator via the mounting and the thin, evaporated electrodes.

For higher mechanical demands, in particular shock and vibration resistance, special installation styles with three or four point fixing have been developed (fig. 4). For the highest demands,

La précision sur l'angle de coupe atteint environ 10" (secondes d'angle), mais d'autres facteurs contribuent à dégrader la dérive thermique des quartz: la limite pratique de stabilité ne se confond pas avec la limite théorique.

Lorsque la dérive thermique de fréquence admissible est peu critique, il suffit d'effectuer un contrôle en trois points. Dans le cas contraire, une mesure en cinq points s'impose et permet de déterminer avec précision les coefficients  $a_1$  et  $a_3$ . Si la courbe ne présente pas d'accident, la précision obtenue sur  $a_3$  est de  $\pm 20\%$ .

Dans d'autres plages de fonctionnement, la précision de la courbe de dérive en fonction de la température peut être améliorée en ajoutant un terme du 4ème ordre dans l'équation de la page 8.

Les quartz de mesure de la température ont une fréquence de résonance dépendant fortement de la température. La courbe caractéristique du quartz de mesure de la température, désigné par taille QT par TELE QUARZ, est pratiquement linéaire dans une gamme de température de  $-40^\circ\text{C}$  à  $+150^\circ\text{C}$ .

Le coefficient linéaire dépend de la conception, sa valeur typique étant de 90 ppm/K. Le coefficient quadratique est de 0.08 ppm/K<sup>2</sup>.

Le boîtier de type HC-52/U est utilisé compte tenu de la faible constante de temps thermique.

#### 4. Boîtier, Soudure électrique

Le résonateur est monté avec une suspension (fig. 4a) qui lui apporte un faible amortissement et n'affecte donc que peu son facteur de surtension.

L'énergie électrique, véhiculée par les ressorts de suspension, est appliquée au cristal par l'intermédiaire de fines électrodes déposées par évaporation sous vide.

Pour répondre à certaines exigences mécaniques (chocs et vibrations),



befestigung entwickelt worden (Abb. 4b). Für höchste Ansprüche bzgl. mechanischer Festigkeit eignet sich insbesondere das Schwingquarzgehäuse HC-35/U, bei dem die Vibratorscheibe an bis zu vier Punkten 'liegend', d.h. parallel zur Bodenplatte montiert ist. Damit ist es möglich, extreme Spitzenbeschleunigungen bis zu 18.000 g zu beherrschen.

i.e. mechanical resistance, the oscillator crystal housing HC-35/U is particularly suitable, whereby the vibrator disc is mounted on up to four points, 'lying', that is, parallel to the base plate. Thereby, it is possible to survive extreme peak accelerations up to 18.000 g.

nous recourons à des fixations du résonateur sur l'embase en trois, ou même quatre points (fig. 4b). C'est le cas du boîtier HC-35/U qui offre les meilleures performances: la lamelle de quartz est montée parallèlement à l'embase sur laquelle elle est fixée en quatre points. Ce montage résiste à une accélération de 18.000 g crête.

Abb. 4a/fig. 4a

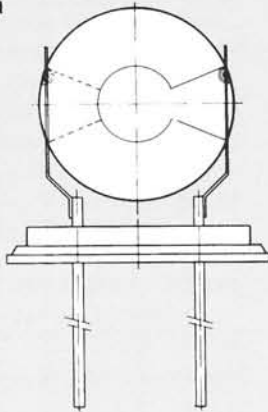
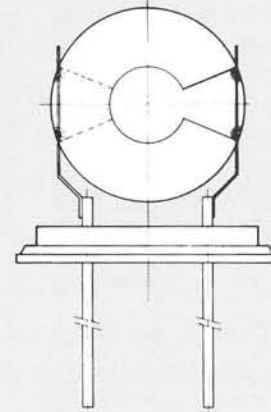


Abb. 4b/fig. 4b



Vor äußeren Einflüssen wird der Quarzvibrator in einem hermetisch verschlossenen mit Schutzgas gefülltem oder evakuiertem Gehäuse geschützt.

Voraussetzung für eine geringe Alterungsrate (zeitliche Änderung der Resonanzfrequenz) ist größte Reinheit des Schutzgases und des Innengehäuses sowie eine einwandfreie hermetische Kapselung. Deshalb kommt der Verschlusstechnik größte Bedeutung zu.

Eine technisch einfache Verschlusstechnik ist das Zusammenlöten von Gehäusekappe und -bodenteil. Nachteilig ist, daß beim Zulöten Flußmitteldämpfe und andere beim Erhitzen freiwerdende Gase in das Gehäuseinnere gelangen und das Alterungsverhalten des Schwingquarzes verschlechtern. Diese Technik ist heute veraltet.

The quartz vibrator is protected from outside influences in a hermetically sealed casing, either filled with protective gas or evacuated. A pre-condition for a low ageing rate is a maximum cleanliness of the protective gas and the inner housing, as well as an impeccable hermetic seal. For that reason, sealing technique is of the utmost importance.

A technically simple type of sealing is by soldering together the housing can and base, however when soldering, fluxing agents and other gases released by the heating reach the inner casing and deteriorate the ageing characteristics of the crystal. This technique is therefore seldom used today.

A type of sealing not subject to these disadvantages is called resistance welding. In this case, can and base are pressed together and welded by means of a current impulse.

Le résonateur est protégé du milieu extérieur par un boîtier hermétique sous vide ou rempli d'un gaz neutre. Le vieillissement (variation à long terme de la fréquence de résonance) dépend entre autres, de la pureté du gaz, de l'état de propreté de l'intérieur du boîtier et de la qualité de sa fermeture. Ce dernier facteur joue un rôle particulièrement important.

La technique la plus simple consiste à braser à l'étain le capôt et l'embase. Cependant, au cours de cette opération, des vapeurs de flux et divers produits de dégazage sont enfermés à l'intérieur du boîtier et nuisent à un bon vieillissement. C'est pourquoi ce procédé est en voie de disparition.

La soudure électrique est un autre mode de fermeture qui ne présente pas ces inconvénients. Les rebords du capôt et de l'embase sont assemblés par pression, puis soudés par une décharge électrique.

Eine nicht mit diesen Nachteilen behaftete Verschlussart ist die Stromverschweißung, auch Widerstandsverschweißung genannt. Hier werden Kappe und Bodenteil zusammengepreßt und mittels eines Stromimpulses verschweißt. In dieser Technik wird heute die übergroße Mehrzahl der Schwingquarze hergestellt.

Wo es auf höchste Alterungsstabilität (Präzisionsoszillatoren) ankommt, verwendet man Allglasgehäuse. Bei diesen wird der Quarzvibrator durch Verschmelzen von Glas-Bodenteil und Glaskappe evakuiert verschlossen.

Für die einzelnen Frequenzbereiche und für die verschiedenen Anwendungen sind mehrere Gehäusegrößen genormt, Seite 44/45. Bedingt durch die nationalen Normengremien gibt es für gleiche Gehäuseausführungen unterschiedliche Bezeichnungen. Allgemein haben sich im praktischen Gebrauch die MIL-Bezeichnungen durchgesetzt, die wir auch bei unseren Datenblättern verwenden. Eine Übersicht finden Sie auf Seite 40/41.

### 5. Ersatzschaltbild und Ersatzdaten

Die elektrischen Eigenschaften des Schwingquarzes als Funktion der Frequenz können in der Umgebung der Resonanzfrequenz durch ein Ersatzschaltbild (Abb. 5a) dargestellt werden. (DIN) IEC 122-2

Die schwingende Masse entspricht der dynamischen Induktivität  $L_1$ , während die Elastizität des Schwingkörpers durch die dynamische Kapazität  $C_1$  repräsentiert wird.

Die Obertonresonanzen sowie die Nebenresonanzen können durch zusätzliche, parallelgeschaltete Serienresonanzkreise dargestellt werden.

Bei hohen Frequenzen (oberhalb 100 MHz) kann zur Modellierung des Verhaltens ein Parallelleitwert  $G_0$  erforderlich sein. In diesem wird auch der Isolationswiderstand modelliert. Dieser kann durch folgende Einflüsse beeinträchtigt werden:

An all-glass housing (enclosure) is used for applications requiring maximum aging stability (precision oscillators). For these, the blanc vibrator is sealed under vacuum by fusing the glass base and the glass cap.

For individual frequency ranges and for different applications, several casing types are standardized, defined by the national standard bodies (IEC, DIN, BS, MIL, etc) and there are different designations for identical enclosures page 44/45. In general, the MIL-designations have prevailed in practical use and we use these in our specification sheets. You will find a summary outline on page 40/41.

### 5. Equivalent circuit and motional parameters

The electrical properties of the oscillator crystal as a function of the frequency can be depicted in the vicinity of the resonance frequency by an equivalent circuit diagram (fig. 5a). (compare IEC-Public. 122-2). The oscillating mass is symbolized by the dynamic inductance  $L_1$ , whereas the elasticity is represented by the dynamic capacitance  $C_1$ .

Overtone resonances, as well as spurious resonances can be depicted by additional, parallel connected series resonance circuits.

At higher frequencies (above 100 MHz), a parallel conductance value  $G_0$  may be required for modelling the behavior. The insulation resistance is also modelled in this. The insulation resistance may be impaired by the following influences:

Lorsqu'une stabilité au vieillissement maximale est requise (oscillateurs de précision), on utilise des boîtiers tout verre. Le résonateur est alors enfermé sous vide par fusion de l'embase et du capot en verre.

Différentes tailles de boîtiers ont été normalisées en fonction des diverses plages de fréquence et applications. Nous devons aux commissions nationales de normalisation d'avoir des désignations différentes pour les mêmes types de boîtiers p. 44/45. La pratique a heureusement adopté la norme MIL que nous avons conjointement retenue avec la norme française NF pour l'établissement de nos documentations. Les dessins des divers boîtiers vous sont présentés p. 40/41 de ce catalogue.

### 5. Schéma équivalent et paramètres

Au voisinage de la fréquence de résonance, les caractéristiques électriques d'un quartz se déduisent du schéma équivalent de la fig. 5a (cf. documents CEI 122-2 et NFC 93-611).

La masse du résonateur correspond à l'inductance dynamique  $L_1$ , cependant que son élasticité est représentée par  $C_1$ . Les résonances, harmoniques ou non, peuvent être simulées par d'autres circuits à résonance série montés en parallèle sur le schéma de base du dipôle équivalent.

Aux fréquences élevées (supérieures à 100 MHz), une conductance en parallèle  $G_0$  peut être nécessaire pour la modélisation du comportement. La résistance d'isolement est également modélisée dans celle-ci. La résistance d'isolement peut être altérée par les facteurs suivants:



1. Feinschluß der Glasdurchführung infolge unzureichender Glasqualität.

2. Langzeiteffekt:

Durch Migration von Elektrodenmaterial (Silber) entlang von sogenannten Ätzkanälen, die sich aufgrund von Nichthomogenitäten beim Kristallwachstum bilden können. Diese Migration kann nur bei Anliegen einer Gleichspannung zwischen den Quarzanschlüssen über einen längeren Zeitraum (mehrere Jahre) auftreten und wurde bisher nur vereinzelt beobachtet. Der Isolationswiderstand kann bis auf einige  $k\Omega$  zusammenbrechen. Dadurch kann in VCXO-Schaltungen der DC-Arbeitspunkt der mit dem Quarz verbundenen Kapazitätsdiode verschoben werden, wodurch sich ein größerer Frequenzversatz einstellen kann.

Es wird daher empfohlen, Quarze gleichspannungsfrei zu betreiben, indem ein Abblockkondensator (einige nF) in Reihe zum Schwingquarz geschaltet wird.

1. Fine leak of the glass feedthrough due to insufficient glass quality.

2. Long-term effect: through the migration of electrode material (silver) along so-called etching channels which can form due to non-homogenities in the crystal growth. This migration can only occur when a DC voltage is applied between the crystal pins over an extended period (several years) and has so far only been observed occasionally. The insulation resistance can collapse down to a few  $k\Omega$ . The result of this is that the DC operating point of the capacitance diode connected to the crystal is displaced in VCXO circuits, which in turn leads to a greater frequency shift occurring.

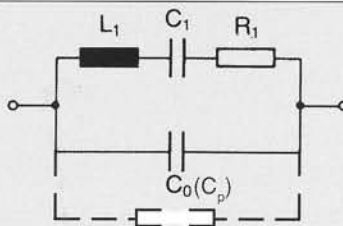
It is therefore recommended to operate quartz crystals free of DC voltage by connecting a blocking capacitor (a few nF) in series to the crystal unit.

1. Terminaison de la traversée de verre suite à une qualité insuffisante du verre:

2. Effet à long terme: Par suite de la migration du matériau des électrodes (argent) le long de caniveaux de corrosion qui peuvent se former en raison du manque d'homogénéité pendant la cristallisation. Cette migration ne peut se produire que lorsqu'on applique une tension continue entre les broches du quartz pendant une période assez longue (plusieurs années), elle n'a été que rarement observée jusqu'ici. La résistance d'isolement peut s'effondrer pour n'être plus que de quelques  $k\Omega$ . Dans les circuits VCXO, le point de travail DC de la diode capacitive reliée à l'oscillateur peut alors se déplacer, ce qui peut provoquer un déport de fréquence plus important.

C'est pourquoi il est recommandé d'utiliser le quartz sans tension continue en montant un condensateur de blocage (de quelques nF) en série avec le quartz.

Abb. 5a/fig. 5a



Ferner ist bei hohen Frequenzen aufgrund der Einflüsse der Zuleitungs- und Streureaktanzen eine Parallelkapazität  $C_p$  wirksam, die sich von der bei tiefen Frequenzen meßbaren statischen Kapazität  $C_0$  unterscheidet.

Die Werte der dynamischen Kapazität  $C_1$  sind im Vergleich zu den Kapazitäten der sonst in der Nachrichtentechnik üblichen Schwingkreise sehr klein und errechnen sich für planparallele Quarzscheiben wie folgt ( $1 \text{ fF} = 10^{-15} \text{ F}$ ):

In addition, a parallel capacitance  $C_p$  which differs from the static capacitance  $C_0$  measurable at low frequencies acts at high frequencies owing to the influences of the lead and leakage reactances.

The value of the dynamic capacitance  $C_1$  is very small in comparison with capacitances normally found in oscillating circuits in telecommunications and is calculated for a plano parallel quartz disc as follows: ( $1 \text{ fF} = 10^{-15} \text{ F}$ ).

En outre, aux fréquences élevées, les réactances du conducteur d'amenée et de fuite entraînent une capacité parallèle  $C_p$  qui diffère de la capacité statique  $C_0$  mesurée aux fréquences basses.

La capacité dynamique est d'un ordre de grandeur bien inférieur aux capacités que l'on rencontre généralement dans les montages. La formule de calcul pour les quartz plans-parallèles est la suivante ( $1 \text{ fF} = 10^{-15} \text{ F}$ ):



$$C_1 \text{ [fF]} = 0,1 \cdot k_c \cdot d_{el}^2 \text{ [mm}^2] \cdot \frac{f_s \text{ [MHz]}}{n^3}$$

$f_s$  = Resonanzfrequenz  
 $d_{el}$  = Elektrodendurchmesser  
 $n$  = Ordnungszahl der Harmonischen (1, 3, 5, 7, 9 .....)  
 $k_c$  = Korrekturkonstante  
 $k = 1$  für Grundwelle  
 $k = 0,85$  für 3. Oberton  
 $k = 0,75$  für 5. und höhere Obertöne

$f_s$  = resonance frequency  
 $d_{el}$  = electrode diameter  
 $n$  = ordinal number of the harmonics (1, 3, 5, 7, 9 ...)  
 $k_c$  = correction constant  
 $k = 1$  for fundamental oscillation  
 $k = 0.85$  for 3rd overtone  
 $k = 0.75$  for 5th and higher overtones

$f_s$  = fréquence de résonance  
 $d_{el}$  = diamètre d'électrode  
 $n$  = rang d'harmonique (1, 3, 5, 7, 9 ...)  
 $k_c$  = facteur de correction  
 $k = 1$  en fondamental  
 $k = 0,85$  sur l'harmonique 3  
 $k = 0,75$  sur les harmoniques supérieures

Bei einer gewünschten Resonanzfrequenz kann durch Variation der Elektrodendurchmesser der  $C_1$ -Wert verändert werden. Der Variationsbereich der Elektrodendurchmesser ist abhängig vom Durchmesser des Quarzvibrators. Nachstehende Aufstellung gibt einen Überblick für die einzelnen Gehäusetypen.

With a given resonance frequency it can be seen that the  $C_1$  can be varied by changing the electrode diameter, this variation is limited by the actual diameter of the quartz vibrator. The following table gives a general view for the individual types:

Il en résulte que, pour une fréquence donnée, on peut obtenir des valeurs différentes de  $C_1$  en variant le diamètre d'électrode, dans certaines limites imposées par le diamètre du résonateur. Le tableau ci-dessous donne un aperçu des valeurs réalisables en fonction des types de boîtiers:

Gehäusetyp enclosure type boîtier	Frequenzbereich (MHz) frequency range (MHz) gamme de fréquence (MHz)	Quarzvibrator (mm) quartz vibrator (mm) diamètre résonateur (mm)	Mögliche Elektroden Ø (mm) possible electrode Ø (mm) diamètre électrodes possibles (mm)
HC-48/U } HC-51/U } HC-27/U }	1,0 MHz - 5 MHz 5,0 MHz - 230 MHz	15,4 13,0	1,8 - 11,5 1,8 - 10,0
HC-50/U } HC-49/U } HC-26/U }	1,8 MHz - 350 MHz 5,0 MHz - 360 MHz	8,9 8,0	1,0 - 5,5 1,0 - 5,0
HC-52/U } HC-35/U }	3,0 MHz - 360 MHz 3,0 MHz - 360 MHz	5,3 5,6	1,0 - 3,5 1,0 - 3,5

Für die Gehäuse HC-48/U, HC-51/U und HC-27/U unterhalb 1,8 MHz, für HC-50/U, HC-49/U, HC-26/U und HC-29/U unterhalb 4,3 MHz und für HC-35/U und HC-52/U unterhalb 8 MHz wird kein planparalleler, sondern ein plan- oder bikonvexer Quarzvibrator verwendet, da sonst eine dämpfungsarme Halterung des Vibrators nicht mehr möglich ist.

Die damit erzielbare dynamische Kapazität ist erheblich kleiner als sie sich nach obiger Berechnungsformel ergeben würde.

Dies ist auch die Erklärung für die Unstetigkeit des  $C_1$ -Verlaufes in den Diagrammen bei den entsprechenden Datenblättern für die Grundwelle dieser Gehäusetypen.

For frequencies lower than 1.8 MHz in enclosures HC-48/U, and HC-51/U, also below 4.3 MHz for enclosures HC-50/U and HC-49/U and also below 8 MHz in enclosures HC-35/U and HC-52/U, it is no longer practicable to use a plano parallel resonator as the losses introduced by the mounting system become intolerable. In these cases by using the grinding techniques of the optical industry either plano-convex or bi-convex resonators are employed.

This technique substantially reduces the values of  $C_1$  (the dynamic capacitance) that are obtained when using a plano parallel resonator.

This is the reason for the non-linearity of the  $C_1$  graph shown on our data sheets for fundamental resonators in these holder styles.

En-dessous de 1,8 MHz en boîtiers HC-48/U et HC-51/U, en-dessous de 4,3 MHz en HC-50/U et HC-49/U et en-dessous de 8 MHz en HC-35/U et HC-52/U, les résonateurs ne sont plus plan-parallèles mais plans-convexes ou biconvexes afin de minimiser l'atténuation apportée par la suspension.

Il en résulte que la capacité dynamique  $C_1$  est beaucoup plus faible que la valeur fournie par la formule ci-dessus.



Bei höheren Grundwellenfrequenzen ab ca. 20 MHz kann das nach obiger Formel geometrisch maximal mögliche  $C_1$  nicht ausgenutzt werden, da dann die Nebenresonanzen unzulässig stark ansteigen. Eine praktische Obergrenze liegt bei ca. 35 fF.

$L_1$  und  $C_1$  sind in bekannter Weise über die Thomson'sche Schwingungsformel verknüpft.

For fundamental frequencies above 20 MHz, the value of  $C_1$  is limited by the unacceptable increase in spurious resonances if the value of  $C_1$  is increased above 35 fF.

$L_1$  and  $C_1$  are related by Thomson's formula

mode fondamental, il est pratiquement impossible de dépasser 35 fF. Des valeurs supérieures feraient apparaître des raies parasites insupportables.

$L_1$  et  $C_1$  sont liés par la formule de Thomson:

$$L_1 = \frac{1}{\omega_s^2 C_1}$$

Der dynamische Verlustwiderstand  $R_1$  verkörpert die molekulare Reibungsverluste des Quarzvibrators, die mechanische Dämpfung durch das Halterungssystem und akustische Dämpfung durch das Schutzgas.

Die statische Parallelkapazität  $C_0$  ist die Kapazität zwischen den aufgedampften Metallelektroden und dem Quarzmaterial als Dielektrikum und es gilt

The dynamic resistance of the crystal unit  $R_1$  represents the mechanical losses due to molecular friction within the resonator plus the damping induced by the mounting system and the acoustic damping of the gasfilled housing.

The static capacitance  $C_0$  represents the capacitance between the evaporated electrodes using the quartz resonator material as the dielectric.

La résistance dynamique  $R_1$  représente un certain nombre de pertes: frottements entre les molécules du cristal, atténuation apportée par la suspension et par le gaz environnant.

La capacité statique parallèle  $C_0$  est celle du condensateur formé par les électrodes du quartz et dont le cristal est le diélectrique:

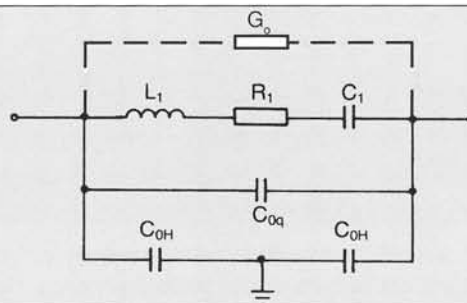
$$C_{0q} [\text{pF}] = 0,02 \cdot d_{\text{el}}^2 [\text{mm}^2] \cdot \frac{f_s [\text{MHz}]}{n}$$

Dazu addieren sich noch die Kapazität des Halterungssystems und die Streukapazitäten zum Gehäuse (0,5 pF bis 2 pF), sodaß sich ein erweitertes Ersatzschaltbild nach Abb. 5b ergibt.

Thus the capacitances of the mounting system and the casing have to be added (0,5 pF to 2 pF), which leads to a new equivalent circuit (as shown in fig. 5b).

Il s'y ajoute la capacité propre de l'embase ainsi que les capacités parasites vis à vis du boîtier (0,5 à 2 pF), si bien que le circuit équivalent est celui de la fig. 5b.

Abb. 5b/fig. 5b



Je nach Gehäuseform, Frequenz und Elektrodenform liegt  $C_0$  zwischen 1 pF und 9 pF. Oszillatorschwingquarze werden mit einem  $C_0 < 7$  pF ausgelegt, wobei dieser Wert gemäß obiger Formel für spezielle Forderungen durch die Elektrodengröße variiert werden kann.

Depending on the particular enclosure type,  $C_0$  normally lies between 1 pF and 9 pF, oscillator crystals are normally designed with  $C_0$  less than 7 pF.

Its value can be influenced by an appropriate electrode diameter.

Selon les boîtiers, la fréquence et la forme des électrodes,  $C_0$  est compris entre 1 pF et 9 pF. On donne généralement  $C_0 < 7$  pF, mais pour certaines applications, il est possible d'obtenir d'autres valeurs en employant un diamètre d'électrode particulier (voir formule ci-dessus). Une limite supérieure est cependant imposée par le diamètre du résonateur.

Für eine genaue Messung des  $C_0$ - Wertes muß angegeben werden, ob mit oder ohne geerdetem Gehäuse gemessen wird. Die Meßfrequenz muß abseits der Resonanzfrequenz und weitab von jeder Störresonanz (Regel- fall 1 MHz bzw. zwischen 10 MHz und 15 MHz) liegen. Die Messung in der Nähe der Resonanzfrequenz führt zur Parallelkapazität  $C_p$ , die insbesondere bei höheren Frequenzen, von  $C_0$  ab- weichen kann.

Die Schwingungsgüte Q ergibt sich nach der Gleichung

For exact measurement of  $C_0$  it is es- sential to indicate if the measurement must be made with the crystal housing grounded or not. Likewise the frequen- cy at which the measurement of  $C_0$  is performed must be off the resonance frequency of the crystal to be measu- red (usually 1 MHz or between 10 MHz and 15 MHz). Measurement near to the resonance frequency indicates the parallel capacitance  $C_p$  which may dif- fer from  $C_0$ , particularly at high fre- quencies.

The quality Q of the quartz crystal units is specified as

Lorsque l'on spécifie une valeur de  $C_0$ , il est nécessaire de préciser si le boîtier doit être mis à la masse. La me- sure s'effectue à une fréquence à la fréquence de résonance et loin de toute résonance parasite; on choisit en général 1 MHz on entre 10 MHz et 15 MHz. La mesure aux alentours de la fréquence de résonance donne la ca- pacité parallèle  $C_p$  qui peut différer de  $C_0$  en particulier aux fréquences éle- vées.

Le coefficient de surtension est donné par

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

Anhaltswerte für erreichbare Gütewer- te gibt die folgende Übersicht:

See the table below for typical practi- cal values of Q.

Le tableau suivant donne quelques valeurs indicatives:

Quarzform quartz form/forme	Frequenzbereich frequency range/gamme de fréquence			Güte quality/surtension
	HC-48/U, HC-51/U HC-27/U	HC-50/U, HC-49/U HC-26/U, HC-29/U	HC-35/U HC-52/U	
Grundwelle: bikonvex fundamental mode: biconvex fondamental: biconvex	800 kHz - 1360kHz	1,8 - 2,5 MHz	4,0 - 5,0 MHz	25.000 - 300.000
plankonvex planoconvex/plan-convexe	1,36 MHz - 1,8 MHz	2,5 - 4,35 MHz	5,0 - 8,0 MHz	100.000 - 400.000
planparallel mit Facette plano parallel with bevel plan-parallele avec biseau	1,8 MHz - 8,5 MHz	4,35 - 1 MHz	8,0 - 12,5 MHz	100.000 - 150.000
planparallel plano parallel/plan-parallèle	8,5 - 40 MHz	11 - 40 MHz	12,5 - 40 MHz	1,0... 2 · 10 <sup>6</sup> /f [MHz]
3. Oberton 3. Obertone/Partiel 3	10 - 190 MHz	15 - 190 MHz	20 - 110 MHz	4 ... 7 · 10 <sup>6</sup> /f [MHz]
5., 7. und 9. Oberton 5., 7. and 9. overtone Partiel 5,7,9	20 - 360 MHz	30 - 360 MHz	40 - 360 MHz	5 ... 10 · 10 <sup>6</sup> /f [MHz]

In Abb. 6 ist der Verlauf des Blindwi- derstandes eines verlustfreien Schwing- quarzes dargestellt. Es ergeben sich 2 Resonanzfrequenzen, die Serienreso- nanzfrequenz  $f_s$  und die Resonanz- frequenz  $f_p$ .

In fig. 6, the curve of the reactance of a lossless crystal resonator is shown. There are 2 resonance frequencies, the series resonance frequency  $f_s$  and the resonance frequency  $f_p$ .

La fig. 6 représente la variation de la réactance d'un quartz supposé sans per- tes. Il apparaît deux fréquences de réso- nance: la fréquence de résonance série  $f_s$  et la fréquence de résonance  $f_p$ .

$$f_s = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad f_p = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L_1 \frac{C_1 \cdot C_0}{C_1 + C_0}}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0}}$$



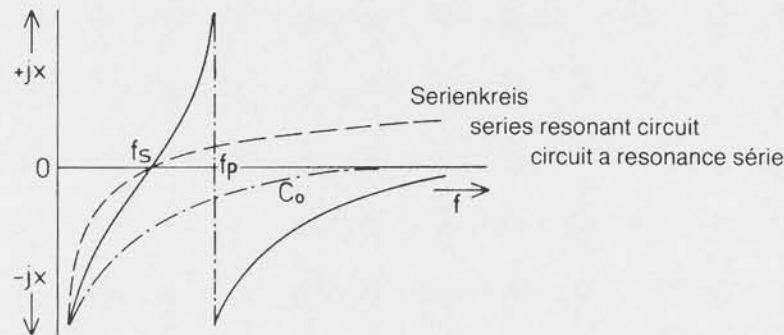
Der relative Frequenzabstand der beiden Frequenzen ist:

The series and parallel resonance frequencies are related by the formula

et l'écart relatif des deux fréquences est donné par

$$\frac{f_p - f_s}{f_s} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{C_1}{C_0}$$

Abb. 6/fig. 6



Beim verlustbehafteten Schwingquarz ist bei der Serienresonanz  $f_s$  des dynamischen Zweiges ( $L_1$ ,  $C_1$ ,  $R_1$ )  $C_0$  parallelgeschaltet, und damit die Gesamtimpedanz erst bei einer etwas höher liegenden Frequenz, der Resonanzfrequenz  $f_r$  reell.

Es gilt für den Scheinwiderstand:

However, for a "lossy" crystal the dynamic branch of the equivalent circuit comprises  $L_1$ ,  $C_1$  and  $R_1$  which are in parallel with  $C_0$ . Thus the impedance of this combination is only real at the resonance frequency  $f_r$  above  $f_s$ .

Furthermore the complex impedance is given by:

Le quartz étant entaché de pertes, la branche dynamique du circuit constituée de  $L_1$ ,  $C_1$  et  $R_1$  est en parallèle avec  $C_0$ . L'impédance de l'ensemble du circuit équivalent ne devient réelle que pour la fréquence de résonance  $f_r$  légèrement supérieure ( $f_r > f_s$ ).

L'impédance complexe est donné par:

$$Z_s = \frac{R_1 \cdot jX_0}{R_1 + jX_0} \quad \text{mit } X_0 = \frac{-1}{\omega C_0}$$

$$= \frac{R_1 X_0^2}{R_1^2 + X_0^2} + j \frac{R_1^2 X_0}{R_1^2 + X_0^2}$$

Der Phasenwinkel bei der Serienresonanzfrequenz  $f_s$  ist also

The phase angle at the series resonant frequency  $f_s$  is given by

L'angle de phase à la fréquence de résonance série  $f_s$  est donc:

$$\varphi = \arctan \left( \frac{R_1}{X_0} \right) = \arctan (-R_1 \omega C_0) = -\arctan R_1 \omega C_0$$

Neben der Serienresonanzfrequenz von  $L_1$ ,  $C_1$  existieren noch weitere charakteristische Frequenzen, die der Ortskurve des Scheinleitwertes (Abb. 7) zu entnehmen sind.

Die für die praktische Anwendung wichtigste Frequenz ist die Resonanzfrequenz  $f_r$  bei Phase 0. Auf diese Frequenz bezieht sich auch die Meßtechnik nach (DIN) IEC 444. Die auf der hochohmigen Seite des Ortskreises liegenden Frequenzen  $f_a$ ,  $f_p$  und  $f_n$  sind in Oszillatoren nicht anregbar. Der Mittelpunkt des Ortskreises liegt unter dem Winkel

$$\varphi_M = \arctan (2 R_1 \omega C_0)$$

im Abstand  $B_0 = \omega C_0$  von der reellen G-Achse entfernt.

The series resonant frequency of  $L_1$  and  $C_1$  is not the only frequency of the quartz crystal, as can be seen from the polar diagram (fig. 7) representing the admittance of the circuit.

The most important frequency for practical application is the resonance frequency  $f_r$  at phase 0. The measurement technique in accordance with (DIN) IEC 444 also refers to this frequency. The frequencies  $f_a$ ,  $f_p$  and  $f_n$  lying at the high-impedance end of the circle cannot be excited in oscillators. The centre of the circle is defined by the angle

$$\varphi_M = \arctan (2 R_1 \omega C_0)$$

and its distance from the real axis given by  $B_0 = \omega C_0$

La fréquence de résonance série due à  $L_1$  et  $C_1$  n'est pas la seule fréquence caractéristique du quartz; les autres apparaissent fig. 7 qui représente le lieu de l'admittance.

La fréquence la plus importante pour l'application pratique est la fréquence de résonance  $f_r$  à phase nulle. C'est à cette fréquence que se réfère la technique de mesure selon (DIN) CEI 444. Les fréquences  $f_a$ ,  $f_p$  et  $f_n$  qui se situent côté haute impédance du cercle ne peuvent pas être excitées dans les oscillateurs.

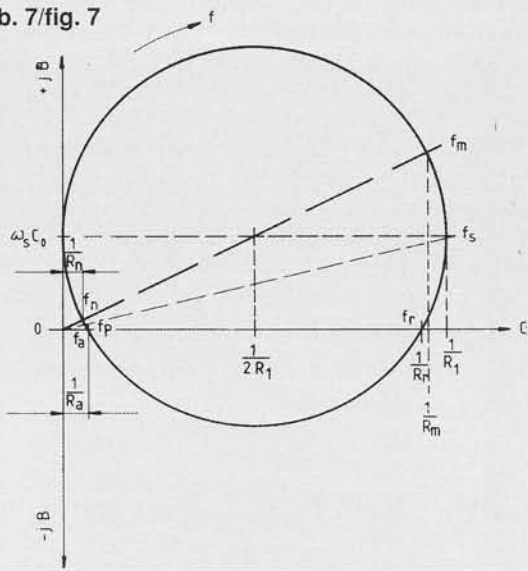
Le centre du cercle est défini par l'angle

$$\varphi_M = \arctan (2 R_1 \omega C_0)$$

et sa distance à l'axe réel G est  $B_0 = \omega C_0$ .



Abb. 7/fig. 7



- $f_r$ : Resonanzfrequenz bei Phase 0  
Resonance frequency with phase 0  
Fréquence de résonance à phase nulle
- $f_s$ : Serienresonanzfrequenz  
Series resonance frequency  
Fréquence de résonance série
- $f_m$ : Maximaladmittanz-(Minimalimpedanz-)Frequenz  
Maximum admittance-(minimum impedance)-frequency  
Fréquence d'admittance maximale (minimale)
- $f_a$ : Antiresonanzfrequenz (Phase 0)  
anti(or negative) resonance frequency (phase 0)  
Fréquence d'anti-résonance (phase 0)
- $f_p$ : Parallelresonanzfrequenz (verlustfrei)  
Parallel resonance frequency (loss-free)  
Fréquence de résonance parallèle (sans pertes)
- $f_n$ : Minimaladmittanz-(Maximalimpedanz-)Frequenz  
Minimum admittance-(maximum impedance)-frequency  
Fréquence d'admittance minimale (impédance maximale)

Bei höheren Frequenzen erscheint der Kreismittelpunkt unter einem immer steileren Winkel, d.h., der Abstand der drei Frequenzen  $f_r$ ,  $f_s$  und  $f_m$  wird immer größer und der Resonanzwiderstand  $R_r$  bei Phase Null wird im Vergleich zu  $R_1$  größer. Die sogenannte Parallelgüte

$$M = \frac{1}{\omega C_0 R_1}$$

ist ein Maß dafür, wie stark  $f_r$  und  $f_s$  bzw.  $R_r$  und  $R_1$  von einander abweichen. Bei Frequenzen oberhalb ca. 120 MHz kann  $M$  kleiner 2 werden, so daß der Ortskreis die reelle Achse nicht mehr schneidet und damit keine reelle Frequenz  $f_r$  mehr vorhanden ist.

### 6. Schwingquarz mit Lastkapazität $C_L$

Schwingquarze werden oft mit einer Lastkapazität betrieben, um die Herstellungs- und Schaltungstoleranzen auszugleichen. Die Lastkapazität wird in Serie oder parallel zum Quarz geschaltet (Abb. 8), wodurch sich eine neue "gezogene" Resonanzfrequenz  $f_L$  ergibt. Diese Betriebsart wird gelegentlich noch als "Parallelresonanz" bezeichnet, obwohl die Lastresonanzfrequenz  $f_L$  sinnvollerweise stets wesentlich näher bei der Resonanzfrequenz  $f_r$  (bzw.  $f_s$ ) als an der Parallelresonanzfrequenz  $f_p$  liegt, und der hier wirksame Lastresonanzwiderstand  $R_L$  nur wenig größer als  $R_r$  (bzw.  $R_1$ ) und viel kleiner als  $R_p$  ist.

With increasing frequency the angle between the centre of the circle and the G-axis increases, thus the frequency differences between  $f_r$ ,  $f_s$  and  $f_m$  also increase. Likewise the resistance  $R_r$  at zero phase also increases in comparison with  $R_1$ . The so-called figure of merit

$$M = \frac{1}{\omega C_0 R_1}$$

shows on the diagram as the difference between  $f_r$  and  $f_s$  (or  $R_r$  and  $R_1$ ). At frequencies above 120 MHz,  $M$  can become smaller than 2, so that the locus no longer cuts the G-axis, thus  $f_r$  disappears and is no longer real.

### 6. Quartz crystal with load capacitance $C_L$

Fundamental mode quartz crystals are normally operated with a load capacitance, which allows the circuit capacitance variations to be compensated. The load capacitance is normally in series or parallel (fig. 8) with the resonator and this causes it to oscillate at a new frequency, which sometimes is called "parallel resonance frequency", even though the load resonance frequency  $f_L$  should always lie far nearer the resonance frequency  $f_r$  (or  $f_s$ ) than the parallel resonance frequency  $f_p$  and the load resonance resistance  $R_L$  which acts in this case is only slightly higher than  $R_r$  (or  $R_1$ ) and far lower than  $R_p$ .

La valeur de l'angle  $\varphi_M$  croît avec la fréquence; il en résulte que l'écart entre les fréquences  $f_r$ ,  $f_s$  et  $f_m$  augmente et la résistance à la résonance  $R_r$  à phase nulle croît par rapport à  $R_1$ . La "surtension parallèle"

$$M = \frac{1}{\omega C_0 R_1}$$

reflète l'écart entre  $f_r$  et  $f_s$  (ou  $R_r$  et  $R_1$ ). Au-dessus de 120 MHz, il se peut que  $M$  devienne moins que deux et que le cercle ne coupe plus l'axe G;  $f_r$  a disparu, il n'y a plus aucune fréquence réelle.

### 6. Quartz et capacité de charge $C_L$

Les quartz sont souvent employés avec une capacité de charge qui sert à compenser les diverses tolérances. Elle est montée en série ou en parallèle avec le quartz dont elle "tire" la fréquence (fig. 8). On appelle parfois cela "résonance parallèle", bien que la fréquence de résonance  $f_L$  de l'ensemble soit logiquement toujours plus proche de la fréquence de résonance  $f_r$  (ou  $f_s$ ) que de la fréquence de résonance parallèle  $f_p$  et bien que la résistance à la résonance  $R_L$  ne soit que faiblement supérieure à  $R_r$  (ou  $R_1$ ) et très inférieure à  $R_p$ .

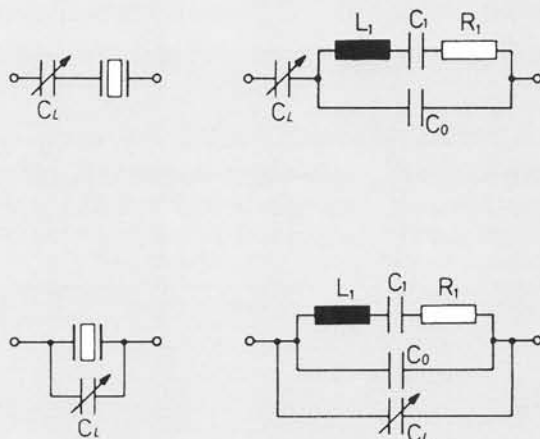


Obertonquarze werden meistens bei der (Serien) Resonanzfrequenz ohne Lastkapazität angewendet, da sich hier die Betriebsfrequenz durch Verstimmen des notwendigerweise vorhandenen Schwingkreises der Oszillatorschaltung einstellen läßt.

Overtone crystals are normally used at (series) resonance without load capacitance as the circuit normally contains a tuned (LC) circuit and the necessary compensation can be achieved by slightly detuning this element.

Les quartz fonctionnant sur des modes harmoniques supérieurs résonnent le plus souvent en série sans capacité de charge. Le réglage de la fréquence s'effectue par le circuit accordé, toujours présent dans ce cas.

Abb. 8/fig. 8

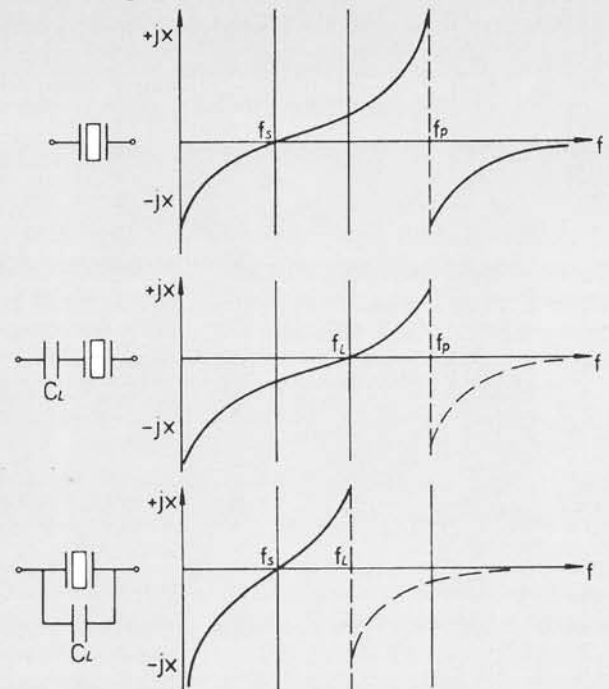


Schaltet man eine Lastkapazität  $C_L$  in Reihe zum Quarz, dann ergibt sich die Lastresonanzfrequenz.

In fig. 9 we show the reactance curves for a quartz crystal, then with a load capacitance in series and then in

Une capacité de charge  $C_L$  en série avec le quartz "tire" la fréquence qui devient:

Abb. 9/fig. 9



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

Der Abstand zwischen Serienresonanzfrequenz  $f_s$  und  $f_L$  ist der gleiche, der sich auch bei Parallelschalten von  $C_L$  zum Schwingquarz ergibt. Für den verlustfreien Fall sind diese Zusammenhänge in Abb. 9 dargestellt. Für den mit einer Serienkapazität gezogenen Quarz ergibt sich ein höherer Resonanzwiderstand  $R_L$

parallel with quartz resonator. In the two latter cases it can be seen that a new frequency is produced.

It can be seen that the difference between  $f_s$  and  $f_L$  is the same whether the capacitance is placed in series or in parallel with the crystal unit. The resistance  $R_L$  with series load capacitor is naturally higher than  $R_1$ .

L'écart de fréquence entre la résonance série  $f_s$  et  $f_L$   $C_L$  aurait été le même si avait été monté en parallèle sur le quartz.

La fig. 9 illustre le comportement d'un quartz réputé sans pertes. Lorsque  $C_L$  est en série avec le quartz, la résistance à la résonance  $R_1$  augmente à  $R_L$  et devient  $R_L$  qui.

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

Der relative Abstand zwischen  $f_L$  und  $f_s$  wird als Lastresonanzfrequenzoffset  $D_L$  bezeichnet:

If one defines the difference in frequency between  $f_L$  and  $f_s$  as load resonance frequency offset  $D_L$ , then we have

Si l'on définit  $D_L$  comme l'écart de fréquence relatif entre  $f_L$  et  $f_s$ , on a

$$D_L = \frac{f_L - f_s}{f_s} \approx \frac{C_1}{2 \cdot (C_0 + C_L)}$$

Unter Ziehbereich versteht man die relative Frequenzänderung zwischen zwei Lastkapazitätswerten (z.B. Anfangs- und Endstellung des Ziehtrimmers):

The pulling range of the element is defined as the change in frequency produced by changing the load capacity from one value to another (e.g. from maximum to minimum of a trimmer capacitor):

et la plage de shift est la variation relative de fréquence correspondant à deux valeurs de capacité de charge (valeurs minimales et maximales d'un trimmer par exemple):

$$D_{L_1, L_2} = \frac{f_{L_1} - f_{L_2}}{f_s} = \frac{C_1 (C_{L_2} - C_{L_1})}{2 \cdot (C_0 + C_{L_1}) \cdot (C_0 + C_{L_2})}$$

Schließlich ist die Ziehempfindlichkeit  $S$  definiert als die Frequenzänderung in ppm pro pF Lastkapazitätsänderung:

Finally, we can define pulling sensitivity  $S$  as the frequency change in parts per million per pF change in the load capacitance:

La sensibilité de shift ( $S$ ) est la variation de fréquence par rapport à la variation de capacité (ppm/pF):

$$S = \frac{1}{f_L} \cdot \frac{df_L}{dC_L} \approx - \frac{C_1}{2 (C_0 + C_L)^2}$$

Diesen Formeln sind folgende Bedingungen zu entnehmen:

From the above formulae we can deduce:

Ces formules amènent à énoncer un certain nombre de remarques.

Da mit kleiner werdender Lastkapazität der Lastresonanzwiderstand  $R_L$  und die Ziehempfindlichkeit  $S$  sehr steil ansteigen, sind allzu kleine Lastkapazitätswerte nach Möglichkeit zu vermeiden. Ein praktischer unterer Grenzwert liegt bei 8 bis 10 pF. Bei hohen  $C_L$ -Werten nimmt die Ziehempfindlichkeit sehr stark ab; Lastkapazitätswerte über 100 pF sind daher meist nicht sinnvoll.

With low value load capacitances, the change/pF would make  $S$  very large and thus the practical minimum value lies in the range between 8 and 10 pF. Conversely, with high load capacitances the pulling sensitivity is very small, so probably 100 pF represents, approximately, the upper limit.

- La résistance à la résonance augmente rapidement lorsque la capacité de charge diminue; il faut donc éviter d'employer des valeurs de capacité très faibles. En pratique, on se limitera à 8 ou 10 pF. Par ailleurs, la sensibilité du shift diminue fortement lorsque  $C_L$  augmente et 100 pF représentent le plus souvent une limite supérieure raisonnable.

Die Ziehfähigkeit des Quarzes kann erheblich vergrößert werden, wenn die statische Kapazität  $C_0$  kompensiert wird (Abb. 10). Die Kompensationsbedingung lautet:

The pulling sensitivity of the crystal unit can be considerably increased if the  $C_0$  is compensated (see fig. 10).

The formula for compensation is:

- La compensation de  $C_0$  permet d'élargir considérablement la plage de ce shift (fig. 10). La formule suivante permet de calculer la self nécessaire:

$$L_p = \frac{1}{\omega_s^2 C_0}$$

Es gilt nun:

Which gives us:

On a donc

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



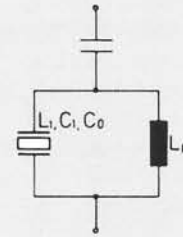
Der Ziehbereich zwischen zwei Werten  $C_{L1}$ ,  $C_{L2}$  wird:

Thus the pulling range between the two values  $C_{L1}$ , and  $C_{L2}$  becomes

et l'expression du shift entre les valeurs  $C_{L1}$  et  $C_{L2}$  devient

$$D_{L2, L1} \approx C_1 \cdot \frac{(C_{L2} - C_{L1})}{2 \cdot C_{L1} \cdot C_{L2}}$$

Abb. 10/fig. 10



Die Zieheempfindlichkeit wird:

and the pulling sensitivity is

et la sensibilité du shift:

$$S = - \frac{C_1}{2 \cdot C_L^2}$$

Eine andere Möglichkeit der Vergrößerung der Ziehfähigkeit ist die Reihenschaltung eines Serienresonanzkreises  $L_L$ ,  $C_L$ . Hier wird die Lastresonanzfrequenz

There is another possibility to increase the pulling sensitivity and this is to replace the series load capacitor with a series tuned circuit comprising  $L_L$ ,  $C_L$  when we have the new formula

Une autre méthode permet d'augmenter la plage de shift: elle consiste à monter un circuit accordé  $L_L$ ,  $C_L$  en série avec le quartz. La fréquence de résonance de l'ensemble devient:

$$f_L = f_S \cdot \left( 1 + \frac{C_1}{2 \cdot \left( C_0 - \frac{1}{\omega_S^2 L_L - \frac{1}{C_L}} \right)} \right)$$

Der Nachteil dieser Schaltung ist, daß die Gesamtgüte des gezogenen Quarzes infolge der niederen Güte von  $L_L$  sehr stark absinkt. Ferner existiert eine zusätzliche Serienresonanzfrequenz aus  $L_L$ ,  $C_L$  und  $C_0$ , die nicht quarzstabil ist und über die parasitäre Schwingung angeregt werden können.

There is however a potential disadvantage to this method, the effective Q of the combination is dramatically reduced due to the relatively low Q of the inductance employed. Furthermore there is also an additional tuned circuit created, consisting of  $L_L$ ,  $C_L$  and the  $C_0$  of the quartz element, this potential parasitic frequency is not quartz controlled.

Ce procédé a l'inconvénient d'abaisser la surtension du quartz en raison du faible Q de la self utilisée. De plus, il apparaît une fréquence de résonance série supplémentaire déterminée par  $L_L$ ,  $C_L$  et  $C_0$ ; elle est indépendante du quartz et une raie parasite de l'oscillateur peut éventuellement provoquer une entrée en oscillation indésirée.

In der Praxis ist es sehr wichtig, die Lastkapazität genau zu bestimmen, da z.B. bei Grundwellenquarzen die Zieheempfindlichkeit bei  $C_L = 30$  pF typisch 10 ppm/pF beträgt.

In practice it is very important to determine accurately the load capacitance or input capacitance of the circuit into which the quartz crystal is to be introduced, as the pulling sensitivity at  $C_L = 30$  pF is about 10 ppm/pF.

Lapratique montre qu'il est important de déterminer avec précision la valeur de la capacité de charge. Les quartz en "fondamental" ont une sensibilité de shift typique de 10 ppm/pF pour  $C_L = 30$  pF.

Die Lastkapazität ist bei der Betriebsfrequenz des Quarzes definiert und ist nicht nur durch die in Reihe oder parallel zum Quarz geschalteten Kondensatoren bestimmt, sondern es addieren sich noch Streukapazitäten zwischen den Bauelementen und Leiterbahnen, die Eingangs- und Ausgangskapazitäten der benachbarten Halbleiter sowie deren nicht idealen Phasendrehung.

This load capacitance is defined during the manufacture of the quartz crystal and in its operational circuit comprises the sum of whatever actual capacitances form the oscillator network plus the stray capacitances of wiring and adjacent semiconductor elements, as well as the phase changes introduced by the latter which have an effect, however small.

Pour une fréquence d'utilisation déterminée, un quartz possède une capacité de charge définie. Elle ne correspond pas seulement à la valeur du condensateur monté en série ou en parallèle sur le quartz, mais il s'y ajoute toutes les capacités parasites du circuit, y compris les capacités d'entrée et de sortie des semi-conducteurs. Ces derniers occasionnent de plus des rotations de phase mal contrôlées dont l'effet n'est pas négligeable.

Le moyen le plus simple pour détermi-



Die einfachste Art der Ermittlung der passenden Lastkapazität besteht darin, mit einem vorhandenen Quarz des gleichen Frequenzbereichs die Betriebsfrequenz in der Mitte des Ziehbereiches zu messen. Anhand dieses Quarzes wird an einem Passivmeßplatz mit veränderbarer Lastkapazität das korrekte  $C_L$  für den Abgleich ermittelt.

Gängige Standardwerte sind 10, 12, 15, 20, 30 oder 50 pF.

Das derzeit gültige Verfahren zur Messung von Lastresonanzfrequenzen ist in (DIN) IEC 444-4 beschrieben.

### 7. Meßmethoden zur Bestimmung der Schwingquarz-Parameter

Zum Messen der Quarzparameter gibt es zwei prinzipielle Methoden, die aktive und die passive Messung.

Bei der aktiven Messung wird der Quarz in einem Oszillator als frequenzbestimmendes Glied eingesetzt. Diese Meßgeräte sind unter dem Namen „Testset“ bekannt geworden und für die verschiedenen Frequenzbereiche entwickelt worden. In diesen Geräten schwingt der Quarz weitgehend unabhängig von seinem Resonanzwiderstand und seinen anderen Parametern  $C_1$ ,  $L_1$  und  $C_0$ . Der Resonanzwiderstand wird z.B. über die Aktivitätsanzeige des Oszillators durch Substitution mit Widerständen ermittelt. In diesen Testsets liegt die absolute Meßgenauigkeit für die Frequenzmessung etwa 10 bis  $15 \cdot 10^{-6}$  und kann durch Vergleichsmessungen zwischen einzelnen Geräten auf 3 bis  $5 \cdot 10^{-6}$  verbessert werden.

Diese Meßgeräte genügen aber meistens nicht mehr den heutigen Anforderungen, da ein Großteil der Schwingquarze mit Abgleichtoleranz von 10 und  $5 \cdot 10^{-6}$  verlangt werden.

The most simple way to determine the load capacitance suitable for a particular circuit is to measure an operational frequency in the middle of the pulling range with an available crystal of approximately the correct frequency. This frequency is then transferred to a passive measuring network in the factory and the operational frequency reproduced by variations of the load capacity in the network, which can then be accurately determined.

Standard values of load capacitance in current use in the industry are 10, 12, 15, 20, 30 or 50 pF.

The current valid method of measuring load resonance frequencies is described in (DIN) IEC 444-4.

### 7. Measurement of quartz crystal parameters

There are basically two methods, normally called either active or passive.

In the active method the crystal unit is used in an oscillator as the frequency determining unit. These oscillators have become known in the industry as 'test sets' and have been developed to cover specific frequency ranges. In a test set the quartz crystal oscillates largely independently of its resonance resistance and its other parameters,  $C_1$ ,  $L_1$  and  $C_0$ . The resonance resistance is determined by the substitution of an equivalent resistor to obtain the same output level from the oscillator. The absolute measurement accuracy of a test set is generally considered to be between 10 and  $15 \cdot 10^{-6}$ . However, with careful adjustment and measurement this can be reduced to be  $5 \cdot 10^{-6}$  between different test sets.

Today however, adjustment tolerances often are as low as 5 or  $10 \cdot 10^{-6}$  and this then precludes the use of 'test sets' for measurement purposes.

The passive or Pi-network method according to IEC-publication 444-1, which claims an accuracy of at least ten times better, is nowadays in general usage.

ner la capacité de charge nécessaire à un circuit donné consiste à utiliser un quartz disponible de fréquence approchant. On mesure la fréquence obtenue dans l'oscillateur en question, l'éventuel trimmer de recalage réglé en position médiane. Le quartz témoin est ensuite mesuré par méthode passive, chargé par un condensateur variable dont la course étalonnée permet de déterminer la valeur précise de  $C_L$ .

Les valeurs les plus courantes sont 10, 12, 15, 20, 30 ou 50 pF.

La méthode employée actuellement pour mesurer la fréquence de résonance est décrite dans la publication CEI 444-4.

### 7. Méthodes de mesure des paramètres des quartz

Il existe actuellement deux méthodes: la mesure active et la mesure passive.

Dans la première, le quartz est inséré dans un oscillateur dont il détermine la fréquence de fonctionnement. Ces appareils sont connus sous le nom de "Test-Set", plusieurs versions existant en fonction de la gamme de fréquence utilisable. Dans ces appareils, le quartz oscille à peu près indépendamment de sa résistance à la résonance et de ses autres paramètres  $C_1$ ,  $L_1$  et  $C_0$ . On détermine par exemple la valeur de la résistance à la résonance du quartz en lui substituant une résistance de valeur connue qui occasionne la même déviation du galvanomètre indicateur d'activité. La précision absolue de ces Test-Set est d'environ 10 à  $15 \cdot 10^{-6}$  de la fréquence. Des mesures comparatives permettent de réduire l'incertitude à 3 ou  $5 \cdot 10^{-6}$ .

De telles performances sont aujourd'hui le plus souvent insuffisantes, car on impose aux quartz une tolérance de charge de 10 à  $5 \cdot 10^{-6}$ .

La précision de mesure doit donc être de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-7}$ , ce qu'atteint la méthode passive décrite par la publication CEI 444-1 et la norme NFC 93-611, Annexe 1.



Aus diesen Gründen muß die Frequenzbestimmung auf etwa  $\approx 5 \cdot 10^{-7}$  genau durchgeführt werden. Diese Forderung wird mit der Passiv-Meßmethode nach (DIN) IEC 444 erfüllt. Das klassische Verfahren aus (DIN) IEC 444-1 bis (DIN) IEC 444-4 wird nachfolgend beschrieben.

For this reason, the frequency must be determined to within an accuracy of approximately  $\approx 5 \cdot 10^{-7}$ . This requirement is met with the passive measurement method in accordance with (DIN) IEC 444. The classic method taken from (DIN) IEC 444-1 (DIN) IEC 444-4 is described below.

La fréquence doit par conséquent être mesurée avec une précision de l'ordre de  $\approx 5 \cdot 10^{-7}$ , ce qu'atteint la méthode passive décrite par CEI 444. La méthode classique suivant CEI 444-1 à CEI 444-4 est décrite ci-après.

### 7.1 Passivmessung bis 125 MHz nach (DIN) IEC 444-1 und 444-2

Der Schwingquarz wird in einem in (DIN) IEC 444-1 genormten Doppel-Pi-Netzwerk entsprechend Abb. 11 eingesetzt, wodurch das Meßobjekt von den angeschlossenen Meßgeräten entkoppelt wird.

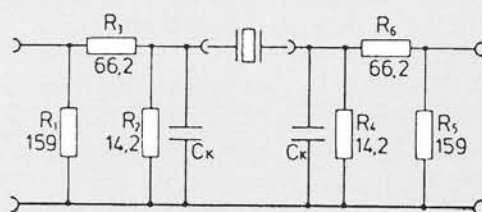
### 7.1 Passive measurement up to 125 MHz according to IEC 444-1 and 444-2

The crystal is in a double Pi-network as shown in fig. 11, which has the effect of isolating the crystal unit from the measuring devices.

### 7.1 Mesure passive jusqu'à 125 MHz suivant CEI 444-1 et 444-2

Le quartz est inséré dans un double circuit en Pi normalisé (fig. 11) qui a pour fonction de séparer le quartz en essai des appareils de mesure.

Abb. 11/fig. 11



Vom Schwingquarz aus gesehen beträgt die Netzwerkimpedanz je 12,5  $\Omega$ . Er ist daher mit nominell 25  $\Omega$  belastet.

Abb. 12 zeigt die prinzipielle Meßanordnung. Die Resonanzfrequenz  $f_r$  ermittelt man, indem der abstimmbare, frequenzstabile Generator (2) auf die Frequenz eingestellt wird, die zwischen den Punkten „A“ und „B“ Phase „Null“ ergibt. Die Messung erfolgt mit einem Vektorvoltmeter oder mit einem Netzwerkanalysator, der die Elemente (4), (5), (6) und gegebenenfalls (1), (2) und (3) enthält.

Die Frequenz wird durch den Zähler (1) angezeigt. Aus dem Verhältnis der Spannungen in Punkt „A“ und „B“ ergibt sich der Resonanzwiderstand des Quarzes. Durch Einstellen der Ausgangsspannung des Generators (2) kann die gewünschte Quarzbelastung erzeugt werden.

Seen from the crystal unit, the network impedance amounts to 12.5 ohms on both sides. It is therefore loaded with 25 ohms nominally.

Figure 12 shows the measuring arrangements. The frequency generator or synthesizer (2) is tuned in to the frequency required, which shows phase 0 between the points 'A' and 'B', measured with a vector-voltmeter or network analyzer (3).

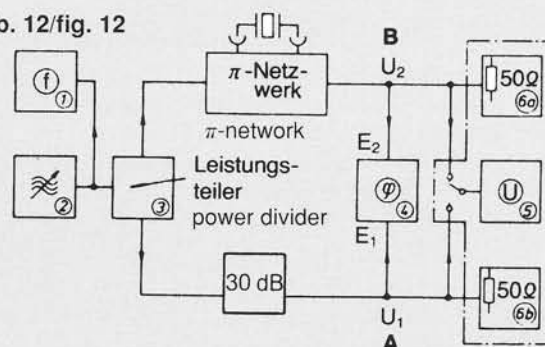
The frequency is indicated by the frequency counter (1) and from the ratio of the voltages at points 'A' and 'B' we can calculate the resonance resistance of the crystal. By variation of the generator output level the desired level of drive can be applied.

L'impédance présentée par le Pi à chaque borne du quartz est de 12,5  $\Omega$ . Il voit donc une charge totale de 25  $\Omega$  nominale.

La fig. 12 montre le synoptique du montage de mesure. On règle le générateur synthétisé (2) de telle manière que la phase soit nulle entre les points A et B, le contrôle étant effectué par voltmètre vectoriel ou analyseur de réseau (3).

La fréquence est indiquée par le fréquencesmètre (1). Le rapport des tensions aux points A et B permet de calculer la résistance à la résonance du quartz. Le niveau d'excitation du quartz dépend du niveau de sortie du générateur et peut être ajusté selon les besoins.

Abb. 12/fig. 12



Die Messung kann halbautomatisch durchgeführt werden, indem die phasenproportionale Ausgangsspannung von (4) entweder analog über einen Regelverstärker oder digital zur Frequenznachstimmung des Generators verwendet wird, wodurch der Generator phasenstarr an den Quarz angekoppelt wird.

It is possible to partially automate this process, the frequency of the generator being controlled by either analogue or digital methods, whereby the phase of the generator is locked to the crystal by means of the phase proportional output voltage of (4).

Cette mesure peut être partiellement automatisée en asservissant la fréquence du générateur à la tension de sortie de (4), de manière soit analogique soit digitale la phase du générateur ainsi verrouillée sur le quartz.

### 7.1.1 Messung von Resonanzfrequenz $f_r$ und Widerstand $R_r$

### 7.1.1 Measurement of the resonance frequency $f_r$ and resistance $R_r$

### 7.1.1 Mesure de la fréquence de résonance $f_r$ et de la résistance $R_r$

Die Messung bei Phase Null ergibt die Resonanzfrequenz  $f_r$ , die – vgl. Ortskurve Abb. 7 – um den kleinen Betrag

The measurement at zero phase gives the resonant frequency  $f_r$  which is higher than the series resonance frequency  $f_s$  determined by the  $L_1$  and  $C_1$  (see fig. 7) and we have

La mesure à phase nulle fournit la fréquence de résonance  $f_r$  qui est supérieure à la fréquence de résonance série  $f_s$  déterminée par  $L_1$  et  $C_1$  (voir fig. 7). L'écart vaut

$$\frac{f_r - f_s}{f_s} = \frac{1}{2Q} \arctan(R_1 \cdot \omega C_0)$$

oberhalb von der Serienresonanz  $f_s$  von  $L_1, C_1$  liegt. Für kleine Phasenwinkel vereinfacht sich dies zu

For small phase angles the relationship may be simplified to

Lorsque l'angle de phase est faible, cette relation se simplifie

$$\frac{f_r - f_s}{f_s} \approx \frac{C_0}{C_1 \cdot 2Q^2} = \frac{r}{2Q^2}$$

$r$  ... Kapazitätsverhältnis/capacitance ratio/rapport de capacités  $\frac{C_0}{C_1}$

$Q$  ... Quarzgüte/quality factor/surtension du quartz

Das Kapazitätsverhältnis  $r$  ist ungefähr 200 für AT-Grundwellenquarze, 2100 für Quarze im 3. Oberton und 6500 für den 5. Oberton. Bei 125 MHz wird mit einem 5. Obertonquarz mit  $Q=80000$  eine Abweichung von  $\pm 5 \cdot 10^{-7} = \pm 0.5$  ppm erreicht.

The capacitance ratio  $C_0/C_1$  is about 200 for AT-cut fundamental resonators, 2100 for 3rd overtone and 6500 for 5th overtone. A deviation of  $\pm 5 \cdot 10^{-7} = \pm 0.5$  ppm is achieved at 125 MHz with a 5th harmonic crystal and  $Q = 80000$ .

Le rapport de capacités vaut environ 200 en coupe AT fondamentale, 2100 en harmonique 3 et 6500 en harmonique 5. Pour un quartz de 125 MHz en harmonique 5 et un facteur de surtension de 80.000 l'erreur de mesure atteint  $\pm 5 \cdot 10^{-7} = \pm 0.5$  ppm de la fréquence.

Für höhere Frequenzen und Obertöne ist eine genaue Messung nur durch Berücksichtigung der statischen Kapazität  $C_0$  (siehe 7.2) möglich. Hier wird dann statt der Resonanzfrequenz  $f_r$  (Phase 0) die Serienresonanzfrequenz  $f_s$  gemessen. Im Grenzbereich muß daher zwischen Hersteller und Anwender vereinbart werden ob  $f_r$  (unkompensiert) oder  $f_s$  (kompensiert) gemessen werden soll. Die Frequenzabweichungen können je nach Oberton und Quarzgüte bis zu  $20 \cdot 10^{-6}$  zwischen beiden Meßmethoden betragen.

For higher frequencies or overtones an exact measurement is only possible where the  $C_0$  has been compensated (see 7.2).

Manufacturer and user must agree, if measurements are to be made in these higher frequency ranges with the static capacity  $C_0$  either compensated or uncompensated, as variations of up to 20 ppm will be seen, dependent on the frequency being measured and the  $Q$  of the resonator.

Pour un quartz de 125 MHz en harmonique 5 et un facteur de surtension de 80.000, l'erreur de mesure atteint  $\pm 5 \cdot 10^{-7} \pm = 0.5$  ppm de la fréquence.

Les fréquences et les rangs d'harmoniques supérieurs imposent de compenser la capacité statique du quartz (voir 7.2).

Selon l'application, le fabricant et son client devront s'accorder sur l'emploi de la mesure compensée ou non, car l'écart entre les deux procédés peut atteindre  $20 \cdot 10^{-6}$  selon le rang d'harmonique et le facteur de surtension.

Die Bestimmung des Resonanzwiderstandes  $R_r$  erfolgt nach folgender Methode:

The measurement of the resonance  $R_r$  is carried out in the following way:

La détermination de la résistance à la résonance  $R_r$  s'effectue de la manière suivante:



1. Im PI-Netzwerk wird mit einem Kurzschluß die Spannung  $U_{BK}$  am Punkt B (Abb. 12) gemessen.
2. Es wird die Spannung  $U_B$  am Punkt B mit dem Schwingquarz bei Phase Null gemessen.

Bei Phase Null zwischen Ein- und Ausgang des Quarzmeßkopfes (Punkt A und B) gilt dann

1. A short circuit is placed in the measurement head and the voltage  $U_{BK}$  is measured at 'B'.
2. The crystal replaces the short circuit and the voltage  $U_B$  is measured at point 'B' at phase zero.

With phase zero between the input and the output of the measuring head (points 'A' and 'B') we then have

1. Une lame de court-circuit est insérée dans le Pi, et l'on mesure la tension  $U_{BK}$  au point B.
2. Le quartz remplace le court-circuit et l'on mesure la tension  $U_B$  au point B, la phase étant nulle.

Lorsque le déphasage entre l'entrée et la sortie de la tête de mesure (points A et B) est nul, on peut appliquer la relation

$$R_r = 25 \Omega \cdot \left( k \cdot \frac{U_{BK}}{U_B} - 1 \right)$$

wobei / whereby / où  $k = \frac{U_A}{U_{AK}} \approx 1$

Für einen typischen Resonanzwiderstand von  $25 \Omega$  kann man die Quarzbelastung  $P_c$  bzw. den Quarzstrom  $I_c$  durch Einstellen des  $U_{BK}$ -Wertes nach den folgenden Beziehungen berechnen:

For example, where the resonance resistance is approximately 25 ohms it is possible to calculate the drive level adjusting the  $U_{BK}$  level in accordance with the relationship.

Lorsque la résistance à la résonance est égale à  $25 \Omega$ , on peut ajuster le niveau d'excitation du quartz en agissant sur la valeur d' $U_{BK}$  selon la relation:

$$U_{BK} \text{ (mV)} = 57,8 \sqrt{P_c \text{ (mW)}}$$

$$U_{BK} \text{ (mV)} L = 9,14 \cdot I_c \text{ (mA)}$$

Für andere Werte von  $R_r$  ergibt sich:

We obtain the following for other values of  $R_r$ :

Avec d'autres valeurs pour  $R_r$ , on a:

$$U_{BK} \text{ (mV)} = 5,18 \cdot (R_r \text{ (}\Omega\text{)} + 25 \Omega) \sqrt{\frac{P_c \text{ (mW)}}{R_r \text{ (}\Omega\text{)}}}$$

$$U_{BK} \text{ (mV)} = 0,183 \cdot I_c \text{ (mA)} \cdot (R_r \text{ (}\Omega\text{)} + 25 \Omega)$$

Bei der Resonanzfrequenz  $f_r$  können die tatsächlichen Werte von Quarzbelastung  $P_c$  und Quarzstrom  $I_c$  direkt aus dem  $U_B$ -Wert errechnet werden:

At the resonance frequency  $f_r$ , the actual values of the drive level can be calculated directly from the  $U_B$  level:

A la fréquence de résonance  $f_r$ , les valeurs réelles du niveau d'excitation du quartz peuvent être calculées directement à partir de la valeur d' $U_B$ .

$$P_c \text{ (}\mu\text{W)} = 0,048 \cdot R_r \text{ (}\Omega\text{)} \cdot U_B^2 \text{ (mV}^2\text{)}$$

$$I_c \text{ (mA)} = \frac{U_B \text{ (mV)}}{4,57}$$

### 7.1.2 Messung der Ersatzdaten $C_1$ , $L_1$

Die dynamische Kapazität und Induktivität des Schwingquarzes können auf verschiedene Arten gemessen werden. Für geringere Genauigkeit (und nur für Frequenzen unterhalb 30 MHz) reicht die Messung mittels Lastkapazitäten,

### 7.1.2 Measurement of parameters $C_1$ and $L_1$

The dynamic capacitance and inductance of the quartz crystal can be determined in several different ways. A method giving limited accuracy for frequencies below 30 MHz is outlined in IEC 302 and utilises the change of

### 7.1.2 Mesure des paramètres $C_1$ et $L_1$

Il est possible de mesurer la capacité dynamique et l'inductance de plusieurs manières. En-dessous de 30 MHz et lorsque la précision requise est faible, la mesure avec capacités de charge est suffisante (publication CEI 302).



wie sie in IEC 302 beschrieben war. Für genaue Messungen sollte die im folgenden beschriebene Phasenoffsetmethode nach (DIN) IEC 444-2 oder die sogenannte Ortskreismethode nach (DIN) IEC 444-5 verwendet werden (siehe 7.2).

### Phasenoffset methode

Der Resonanzwiderstand  $R_r$  wird, wie oben beschrieben, bei Phase Null gemessen. Die Generatorfrequenz wird nun so verstellt, daß sich eine Phasendifferenz  $+\varphi$  bzw.  $-\varphi$  einstellt. Aus der Frequenzdifferenz  $\Delta f_{\pm\varphi}$  ergibt sich dann

frequency with two different load capacities.

For exact measurement and above 30 MHz the phase offset method described below should be used as outlined in IEC 444-2 or the so-called circle method in accordance with (DIN) IEC 444-5, see 7.2.

### Phase offset method

As previously indicated one measures resonance resistance  $R_r$  at phase zero. The generator frequency is now adjusted in such a way that a phase difference of  $+\varphi$  and  $-\varphi$  is provided. From the frequency  $\Delta f_{\pm\varphi}$  we can derive:

Audessus de 30 MHz ou lorsque la précision doit être élevée, il faut employer la méthode d'offset de phase (publication CEI 444-2). Décrivez ciaprès ou la méthode dite de transmission directe (publication CEI 444-5), voir 7.2.

### Mesure par offset de phase

Comme précédemment, on mesure la résistance  $R_r$  à phase nulle, puis on décale la fréquence du générateur de manière à créer un écart de phase  $+\varphi$  ou  $-\varphi$ . L'écart de fréquence  $\Delta f_{\pm\varphi}$  permet de calculer  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{\Delta f_{\pm\varphi}}{2 \pi f_r^2 \cdot R_{\text{eff}} \cdot \tan \varphi}$$

wobei wegen des quarzseitigen Abschlußwiderstandes des PI-Netzwerkes von  $R_T = 25 \Omega$   
 $R_{\text{eff}} = R_r + R_T = R_r + 25 \Omega$   
 ist.

but because of the Pi-network impedance of 25 ohms, then:  
 $R_{\text{eff}} = R_r + R_T = R_r + 25 \Omega$

Comme l'impédance du Pi de mesure vue par le quartz est de  
 $R_{\text{eff}} = R_r + R_T = R_r + 25 \Omega$

Analog ist

We have

On obtient par cette même méthode  $L_1$

$$L_1 = \frac{R_{\text{eff}}}{2 \pi \Delta f_{\pm\varphi}} \cdot \tan \varphi$$

und die Güte

and for Q

et Q:

$$Q = \frac{\omega_r L_r}{R_r} = \frac{1}{\omega_r C_1 R_r}$$

Bei einem Phasenoffset von  $45^\circ$  vereinfachen sich wegen  $\tan 45^\circ = 1$  diese Formeln.

Diese Formeln gelten nur bei Vernachlässigung der statischen Kapazität  $C_0$ . Den dadurch entstehenden Meßfehler zeigt Abb. 13 in Abhängigkeit vom gewählten Phasenoffset mit der sogenannten Parallelgüte.

With phase offsets of  $45^\circ$ , the value of  $\tan 45^\circ = 1$  and the formulae are simplified.

These formulae are only valid if the value of  $C_0$  is ignored. Figure 13 gives a graphical illustration of the measurement error of  $C_1$  depending on the figure of merit M with respect to the phase offset.

A remarquer que les calculs ci-dessus se simplifient pour  $\varphi = 45^\circ$ , car  $\tan 45^\circ = 1$ .

Négliger  $C_0$  occasionne une erreur de mesure variable en fonction de l'écart de phase. La fig. 13 en donne une illustration graphique ("surtension parallèle" M).

$$M = \frac{1}{\omega_r C_0 R_r}$$

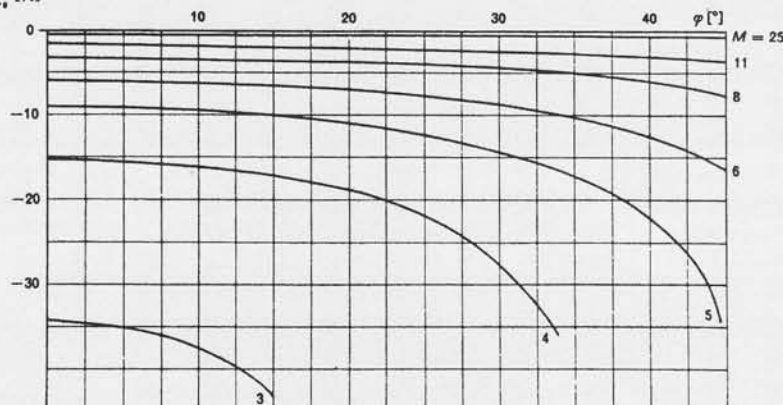
als Parameter.

as parameter.

en parametre.



Abb. 13/fig. 13

 $\left(\frac{\delta c_i}{c_i}\right)_c, [\%]$ 

### 7.2 Messung nach der Ortskreismethode (DIN) IEC 444-5 bis 500 MHz.

Das oben beschriebene Verfahren nach (DIN) IEC 444-2 wird mehr und mehr durch ein neues genaueres Verfahren nach (DIN) IEC 444-5 abgelöst werden, das von uns als "Ortskreis-Methode" bezeichnet wird. Bei gleichem Meßaufbau wie in Bildern 11 + 12 wird eine Fehlerkorrektur durch komplexe Modellierung des Pi-Glieds durchgeführt, die sich auf eine erweiterte Kalibrierung mit Kurzschluß, Leerlauf und Kalibrierwiderstand stützt. Die Meßpunkte liegen nicht notwendigerweise exakt bei der Resonanzfrequenz  $f_r$  bzw.  $f_s$ , sondern sind in geeigneter Form auf dem Admittanz-Ortskreis verteilt. Die neue (DIN) IEC 444-5 (in Vorbereitung) beschreibt mehrere Software-Algorithmen zur Berechnung der dynamischen Ersatzparameter aus den komplexen Impedanzwerten des Quarzes, die bei den Meßfrequenzen bestimmt wurden. Dieses Verfahren ist nicht auf Messungen von Amplituden und Phasen mit dem Pi-Glied beschränkt, sondern kann auch auf S-Parameter-Meßplätze angewandt werden.

#### Verfahren:

##### 7.2.1 Kalibrierung

Kalibrierung mit Kurzschluß, Messung der Ausgangsspannung des B-Kanals.

### 7.2 Measurement in accordance with the circle method (DIN) IEC 444-5 up to 500 MHz.

The above-described method in accordance with (DIN) IEC 444-2 is, to an ever-increasing extent, being superseded by a new, more precise method in accordance with (DIN) IEC 444-5 which we term the „circle method“. Error correction is carried out by complex modelling of the Pi section, with the same measuring set-up as in Figures 11 + 12, and on the basis of extended calibration with short-circuit no-load state and calibration resistor. The measurement points do not necessarily lie exactly at the resonance frequency  $f_r$  or  $f_s$  but are suitably distributed on the admittance circle. The new version of (DIN) IEC 444-5 (currently in preparation) describes several software algorithms for computing the dynamic equivalent parameters from the complex impedance values of the crystal determined at the measuring frequency. This method is not restricted to measurements of amplitude and phase with the Pi section but can also be applied to S parameter test sets.

#### Method:

##### 7.2.1 Calibration

Calibration with short circuit, measurement of the output voltage of the B channel.

### 7.2 Mesure selon la méthode de transmission directe (CEI 444-5) jusqu'à 500 MHz.

La méthode selon la publication CEI 444-2 décrite précédemment est remplacée de plus en plus souvent par une méthode plus récente et plus précise selon la publication CEI 444-5. Nous l'appelons „méthode de transmission directe“. Avec le même montage de mesure que celui des figures 11 et 12, l'erreur est corrigée par une modélisation complexe du Pi. Cette correction est basée sur un calibrage supérieur avec court-circuit et résistance de calibrage. Les points de mesure ne se situent pas nécessairement exactement à la fréquence de résonance  $f_r$  ou  $f_s$  mais sont répartis de manière adéquate sur le cercle d'admittance. La nouvelle publication CEI 444-5 en cours de préparation décrit plusieurs algorithmes de calcul des paramètres dynamiques à partir des impédances complexes du quartz qui ont été déterminées aux fréquences de résonance. Cette méthode ne se limite pas à des mesures d'amplitude et de phase avec la section Pi mais peut également être appliquée à la mesure de paramètres S.

#### Méthode:

##### 7.2.1 Calibrage

Calibrage avec court-circuit, mesure de la tension de sortie du canal B.

$$\underline{U}_{BK} = \underline{U}_{BK} / \varphi_{BK}$$

Eichung mit Kalibrierwiderstand  
 $\underline{R}_N = R_e(\underline{R}_N) + j\text{Im}(\underline{R}_N)$  ergibt

Calibration with calibration resistor  
 $\underline{R}_N = R_e(\underline{R}_N) + j\text{Im}(\underline{R}_N)$  results in

L' étalonnage avec une résistance de  
 calibrage  $\underline{R}_N = R_e(\underline{R}_N) + j\text{Im}(\underline{R}_N)$  donne

$$\underline{R}_N = \left( \frac{U_{BK}}{U_{BN}} - 1 \right) \cdot RT$$

Messung einer unbekanntnen Impedanz  
 $\underline{R}_x = R_e(\underline{R}_x) + j\text{Im}(\underline{R}_x)$  bei einer Meß-  
 frequenz  $f_x$  ergibt

Measurement of an unknown  
 impedance  $\underline{R}_x = R_e(\underline{R}_x) + j\text{Im}(\underline{R}_x)$  at a  
 measurement frequency  $f_x$  results in

La mesure d'une impédance inconnue  
 $\underline{R}_x = R_e(\underline{R}_x) + j\text{Im}(\underline{R}_x)$  à une fréquence  
 de mesure  $f_x$  donne

$$\underline{R}_x = \left( \frac{U_{BK}}{U_{BX}} - 1 \right) \cdot RT$$

Daraus kann  $\underline{R}_x$  bestimmt werden  
 durch:

$\underline{R}_x$  can be determined from this by

Il est possible d'en déterminer  $\underline{R}_x$  par:

$$\underline{R}_x = \underline{R}_N \frac{\frac{U_{BK}}{U_{BX}} - 1}{\frac{U_{BK}}{U_{BN}} - 1}$$

Aus der Kalibrierung bei Leerlauf wird  
 die Übersprechkapazität  $C_c$  (Über-  
 sprechimpedanz  $\underline{R}_{Cc}$ ) mit der obigen  
 Formel ermittelt, wobei  $U_{BX}$  durch die  
 B-Kanal-Ausgangsspannung bei Leer-  
 lauf  $U_{BL} = U_{BL} / \varphi_{BL}$  ersetzt wird. Aus  
 dem Imaginärteil des dadurch berech-  
 neten  $\underline{R}_x = \underline{R}_{Cc}$  berechnet sich  $C_c$  zu

The crosstalk capacitance  $C_c$   
 (crosstalk impedance  $\underline{R}_{Cc}$ ) can be  
 determined with the above formula and  
 calibration at no load, whereby  $U_{BX}$  is  
 substituted by the B channel output  
 voltage at no load  $U_{BL} = U_{BL} / \varphi_{BL}$ .  
 $C_c$  can be calculated as follows from  
 the imaginary component of  $\underline{R}_x = \underline{R}_{Cc}$   
 thus calculated

A partir du calibrage à vide, on calcule  
 la capacité  $C_c$  (impédance  $\underline{R}_{Cc}$ ) avec la  
 formule ci-dessus,  $U_{BX}$  étant remplacé  
 par la tension de sortie du canal B à  
 vide  $U_{BL} = U_{BL} / \varphi_{BL}$ .  
 A partir de la partie imaginaire de  
 $\underline{R}_x = \underline{R}_{Cc}$  ainsi calculée,  $C_c$  est obtenu  
 avec

$$C_c = \frac{1}{2 \pi f_c \cdot \text{Im}(\underline{R}_{Cc})}$$

## 7.2.2 Messung der Quarzparameter

## 7.2.2 Measurement of the crystal parameters

## 7.2.2 Mesure des paramètres du quartz

### 1.) Messung der Kapazitäten $C_0$ , $C_p$

### 1.) Measurement of the capacitances $C_0$ , $C_p$

### 1.) Mesure des capacités $C_0$ , $C_p$

Neben der statischen Kapazität  $C_0$ , die  
 bei 1 MHz mit einer Kapazitätsmeß-  
 brücke gemessen wird, kann mit dem  
 Verfahren die bei der Quarzfrequenz  
 wirksame Parallelkapazität  $C_p$  be-  
 stimmt werden.

Besides the static capacitance  $C_0$   
 which is measured at 1 MHz with a  
 capacitance bridge, this method can  
 be used to determine the parallel  
 capacitance  $C_p$  acting at the crystal  
 frequency.

Outre la capacité statique  $C_0$  mesurée  
 à 1 MHz avec un pont de capacités,  
 cette méthode permet de déterminer la  
 capacité parallèle  $C_p$  à la fréquence du  
 quartz.

Der Quarz wird in das PI-Netzwerk  
 eingesetzt und bei der Frequenz  $f_c$  die  
 komplexe Spannung  $U_{BC}$  gemessen.  
 $C_p$  ergibt sich dann aus dem Imaginär-  
 teil der gemessenen Impedanz zu:

The crystal is connected into the Pi  
 section and the complex voltage  $U_{BC}$  is  
 measured at frequency  $f_c$ .  $C_p$  then  
 results from the imaginary component  
 of the measured impedance, as  
 follows:

Le quartz est incorporé à la section Pi  
 et la tension complexe  $U_{BC}$  est  
 mesurée à la fréquence  $f_c$ . On obtient  
 alors  $C_p$  à partir de la partie imaginaire  
 de l'impédance mesurée avec:



$$C_p = \frac{\frac{U_{BK}}{U_{BN}} - 1}{\left( \frac{U_{BK}}{U_{BC}} - 1 \right) \cdot j\omega R_N} - C_c$$

## 2. Messung der charakteristischen Frequenz und der dynamischen Parameter

Mit der in 7.2.1 beschriebenen Methode wird bei zwei Frequenzen  $\omega_1$  und  $\omega_2$  die Quarzimpedanz bestimmt und die Werte in Admittanzform dargestellt:

## 2.) Measurement of the characteristic frequencies and the dynamic parameters

The method described in 7.2.1 involves determining the crystal impedance at two frequencies  $\omega_1$  and  $\omega_2$  and representing the values as admittance values:

## 2.) Mesure des fréquences caractéristiques et des paramètres dynamiques

Avec la méthode décrite en 7.2.1, l'impédance du quartz est déterminée à deux fréquences  $\omega_1$  et  $\omega_2$  et les valeurs sont représentées sous forme d'admittances:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \frac{1}{R_1}(\omega_1) = a_1 + jb_1 \\ Y_2 &= \frac{1}{R_1}(\omega_2) = a_2 + jb_2 \end{aligned}$$

Aus diesen können die dynamischen Quarzparameter explizit berechnet werden zu:

From these, it is possible to calculate the dynamic crystal parameters explicitly as follows:

A partir de celles-ci, les paramètres dynamiques du quartz peuvent être calculés explicitement avec:

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{\omega_1 \cdot b_1^* - \omega_2 \cdot b_2^*}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \\ C_1 &= \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_2^2 \omega_1 b_1^* - \omega_1^2 \omega_2 b_2^*} \\ R_1 &= \frac{a_1^* + a_2^*}{2} \\ \text{mit } a_1^* + jb_1^* &= \frac{1}{a_1 + j(b_1 - \omega_1(C_0 + C_c))} \\ \text{with} & \\ \text{ou} & \end{aligned}$$

Auch bei ungünstiger Lage der Meßfrequenzen  $\omega_1$  und  $\omega_2$  wird die aus  $L_1$  und  $C_1$  berechnete Serienresonanzfrequenz, bereits sehr genau,

Even if the position of the measuring frequencies  $\omega_1$  and  $\omega_2$  is unfavorable, the series resonance frequency calculated from  $L_1$  and  $C_1$  is given by:

Même si les fréquences de mesure  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont défavorables, la fréquence de résonance série calculée à partir de  $L_1$  et  $C_1$  est déjà très précise:

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

so daß daraus gegebenenfalls günstiger liegende weitere Meßfrequenzen bestimmt werden können. Die optimalen Meßfrequenzen liegen bei  $\pm 45^\circ$  bezogen auf den Punkt  $f_s$ , d.h. beim "oberen" und "unteren" Scheitelpunkt des Ortskreises.

on the basis of this, other, more favorable measuring frequencies can be determined if necessary. The optimum measuring frequencies lie at around  $\pm 45^\circ$  referred to point  $f_s$ , i.e. at the „top“ and „bottom“ point of the circle.

à partir desquelles on peut donc le cas échéant calculer d'autres fréquences de résonance plus favorables. Les fréquences de mesure optimales se situent à  $\pm 45^\circ$  par rapport au point  $f_s$ , c'est-à-dire au sommet „supérieur“ et „inférieur“ du cercle.



Alternativ kann eine Grobbestimmung von  $f_s$  auch dadurch erfolgen, daß im erwarteten Frequenzbereich schnell "nach plus" und einmal "nach minus" gewobbelt wird und der Mittelwert der sich ergebende Maximaladmittanzfrequenz als Startwert für  $f_s$  gesetzt wird.

Das hier beschriebene Meßverfahren kann bis über 500 MHz verwendet werden. Es wurde bis über 900 MHz bei IEC TC 49 verifiziert. Näheres entnehmen Sie einem TQ-Sonderdruck.

Die Meßtechnik ist nicht auf eine Meßtechnik von Amplituden und Phasen mit dem PI-Netzwerk beschränkt, sondern kann auch auf S-Parameter-Meßplätzen mit Fehlerkorrektur angewandt werden. Einzelheiten siehe (DIN) IEC 444-5

Die in IEC 444-3 beschriebene Methode zur Messung von Quarzen oberhalb 125 MHz bis 200 MHz mit Hilfe von physikalischer  $C_0$ -Kompensation wird mit dem oben beschriebenen Verfahren obsolet und entspricht nicht mehr dem Stand der Technik.

### 7.3 Messung der Lastresonanz (DIN) IEC 444-4

Die Messung der Lastresonanzfrequenz  $f_L$  mit dem Lastresonanzwiderstand  $R_L$  und der damit verbundenen Größen Lastresonanzfrequenz-Offset  $D_L$ , Ziehbereich  $D_{L1,L2}$  und Ziehempfindlichkeit  $S$  erfolgte bisher im PI-Netzwerk unter Verwendung eines Last-C-Vorsteckers gemäß (DIN) IEC 444-4.

Die dabei auftretenden Meßfehler sind wesentlich größer als die Messung von  $f_r$  und  $R_r$ . Eine Analyse der Meßfehler ist in einem Sonderdruck dargestellt. TELE QUARZ benutzt daher inzwischen eine moderne Methode ohne Last-C-Vorstecker. Die Lastresonanzfrequenz wird im normalen PI-Netzwerk softwaremäßig ermittelt. Durch ein iteratives Suchverfahren wird die Frequenz  $f_L$  ermittelt, bei der der Schwingquarz die durch die Lastkapazität gegebene komplexe Impedanz besitzt.

Alternatively, it is also possible to approximately determine  $f_s$  by sweeping quickly „to positive“ and then „to negative“ in the anticipated frequency range and taking the mean value of the resultant maximum admittance frequency as the starting value for  $f_s$ .

The measuring method described above can be used up to frequencies of 500 MHz and above. It has been verified at IEC TC 49 up to 900 MHz and above. Please refer to the special TQ publication for further details.

The measurement technique is not restricted to a measurement technique of amplitude and phase with the Pi section but can also be used on S parameter test sets with error correction. See (DIN) IEC 444-5 for details.

The method for measurement of crystals above 125 MHz to 200 MHz with the aid of physical  $C_0$  compensation, described in IEC 444-3, is thus rendered obsolete with the above-described method and is no longer state-of-the-art.

### 7.3 Measurement of the load resonance (DIN) IEC 444-4

To date, the measurement of the load resonance  $f_L$  with the load resonance resistance  $R_L$  and the associated parameters of load resonance frequency offset  $D_L$ , pulling range  $D_{L1,L2}$  and pulling sensitivity  $S$  has generally been conducted in the Pi section using a load C adaptor in accordance with (DIN) IEC 444-4.

The resultant measuring errors are far higher than when measuring  $f_r$  and  $R_r$ . A special publication provides an analysis of the measurement errors. Thus, TELE QUARZ now uses a modern method without load C adaptor. The load resonance frequency is determined by software in the normal Pi measuring head. An iterative search method determines the frequency  $f_L$  at which the crystal has a complex impedance given by the load capacitance.

$f_s$  peut également être déterminé approximativement en wobblant rapidement „en sens plus“ et „en sens moins“ dans la plage de fréquence prévue et en utilisant comme valeur de départ pour  $f_s$  la moyenne de la fréquence d'admittance maximale obtenue.

La méthode de mesure décrite peut être utilisée jusqu'à plus de 500 MHz et a été vérifiée à plus de 900 MHz par CEI TC 49. Pour plus de détails, veuillez vous référer à une publication particulière de TQ.

La technique de mesure n'est pas limitée à la mesure d'amplitude et de phase avec la section Pi mais elle peut également être appliquée à la mesure des paramètres S avec correction d'erreur. Pour les détails, voir la publication CEI 444-5.

La méthode de mesure décrite par la publication CEI 444-3 pour les quartz au-dessus de 125 MHz à 200 MHz à l'aide d'une compensation physique de  $C_0$  est rendue obsolète par la méthode ci-dessus et ne correspond plus à l'état de la technique.

### 7.3 Mesure de la résonance de charge (DIN) IEC 444-4

La mesure de la fréquence de résonance de charge  $f_r$  avec la résistance de résonance de charge  $R_L$  et de l'offset de la fréquence de résonance de charge  $D_L$ , la plage de shift  $D_{L1,L2}$  et la sensibilité de shift  $S$  qui en découlent, était jusqu'à présent effectuée le plus souvent dans la section Pi en utilisant une fiche de charge C selon CEI 444-4.

Les incertitudes de mesure correspondantes sont considérablement supérieures à la mesure de  $f_r$  et  $R_r$ . Une analyse des erreurs de mesure figure dans un tiré à part. TELE QUARZ utilise par conséquent aujourd'hui une méthode moderne sans fiche de charge C. La fréquence de résonance de charge est déterminée par logiciel dans la tête de mesure Pi normale. La fréquence  $f_L$ , à laquelle le quartz a l'impédance complexe due à



$$Z_L = R_L + jX_L$$

mit  
with  
ou

$$X_L = \frac{1}{\omega C_L}$$

$$R_L = R_i \left( 1 + \frac{C_o}{C_L} \right)^2$$

Da (insbesondere unterhalb 30 MHz) der Wert von  $X_L$  wesentlich größer ist als  $R_L$ , wird die Frequenz ermittelt, bei der die Quarzimpedanz den Imaginärteil  $X_L$  zeigt. Die Impedanzberechnung erfolgt wie in Abschnitt 7.2.1 beschrieben (Ortskreismethode).

Besondere Sorgfalt ist dabei auf die Berücksichtigung der korrekten Quarzbelastung zu legen.

Dieses Verfahren wurde durch umfangreiche Vergleichsmessungen bestätigt. Es zeigt sich eine Verbesserung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit gegenüber der Vorstecker-Methode um den Faktor 3 bis 5.

Dieses Verfahren wird bei IEC vorbereitet. Näheres erscheint als TQ-Sonderdruck (in Vorbereitung).

Since (below 30 MHz in particular), the value of  $X_L$  is far higher than  $R_L$ , the frequency is determined at which the crystal impedance indicates the imaginary part  $X_L$ . The impedance is calculated as in Section 7.2.1 (circle method).

Particular care must be taken to ensure that the correct crystal load is allowed for.

This method has been verified by extensive comparison measurements. It provides an improvement by a factor of 3 to 5 in accuracy and reproducibility as compared with the adaptor method. This method is currently under preparation at IEC. Further details are to be described in a special publication.

la capacité de charge, est déterminée par une méthode de recherche itérative. Etant donné que la valeur de  $X_L$  est sensiblement supérieure à  $R_L$  (notamment au-dessous de 30 MHz), on détermine la fréquence à laquelle l'impédance du quartz présente la valeur imaginaire  $X_L$ .

L'impédance est calculée comme décrit en 7.2.1 (méthode de transmission directe).

Il est important à cet égard que la charge du quartz soit correcte. Cette méthode a été confirmée par de nombreuses mesures comparatives. La précision et la reproductibilité sont multipliées par 3 à 5 par rapport à la méthode avec fiche. Cette méthode est en cours de préparation par la CEI. De plus amples informations figureront dans un tiré à part de TQ (en préparation).

## 8. Nebenresonanzen

Bei jedem Schwingquarz treten außer der Hauptresonanz auch Nebenresonanzen (Nebenwellen) auf. Im Ersatzschaltbild (Abb. 5a – 5b) werden sie durch zusätzliche Serienschwingkreise parallel zu  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$  dargestellt. Das Verhältnis von Nebenresonanzwiderstand  $R_{NW}$  zum Resonanzwiderstand  $R_i$  der Hauptwelle wird meistens im Dämpfungsmaß dB angegeben, und als Nebenwellendämpfung  $a_{NW}$  bezeichnet:

## 8. Spurious resonances

All quartz crystals have spurious resonances (unwanted resonance responses) besides the main resonance frequency. They are represented in the equivalent circuit diagram (Fig. 5a - 5b) by additional resonant circuits in parallel with  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$ .

The ratio of spurious resonance resistance  $R_{NW}$  to resonance resistance  $R_i$  of the main wave is generally specified in the attenuation constant dB and is designated spurious attenuation  $a_{NW}$ :

## 8. Résonances parasites

Tous les quartz présentent une résonance principale et des résonances secondaires (résonances parasites). Dans le schéma équivalent (5a - 5b), elles sont représentées par des circuits série accordés supplémentaires en parallèle avec  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$ . Le rapport de la résistance de résonance secondaire  $R_{NW}$  à la résistance de résonance  $R_i$ , la raie principale est exprimée le plus souvent en dB, est appelé atténuation de raies parasites  $a_{NW}$ :

$$a_{NW} = 20 \cdot \lg \frac{R_{NW}}{R_i}$$

Für Oszillatorquarze sind in der Regel 3 bis 6 dB ausreichend. Bei Filterquarzen werden oft 40 dB und mehr gefordert. Dies ist allerdings nur durch ein spezielles Quarzdesign und mit kleiner dynamischer Kapazität zu erreichen.

For oscillator crystals 3 to 6 dB are normally sufficient. For filter crystals attenuations greater than 40 dB are often required. This can only be achieved by special design techniques and involves the use of very small values of the dynamic capacity  $C_1$ .

Lorsqu'un quartz doit être employé dans un oscillateur, une atténuation de 3 à 6 dB suffit généralement. Pour une application "filtre", il n'est pas rare que 40 dB soient nécessaires, et parfois plus. De telles valeurs ne sont réalisables qu'avec des quartz spéciaux qui ont une faible capacité dynamique.

Die erreichbare Dämpfung verringert sich mit höherer Frequenz und höherem Oberton. Planparallele Quarze besitzen eine bessere Nebenresonanzdämpfung als plan- und bikonvexe Quarze.

Neben der Nebenwellendämpfung sollte auch der Bereiche des Frequenzabstandes der Nebenwellen angegeben werden. Die sogenannten anharmonischen Nebenresonanzen liegen beim AT-Schnitt jeweils oberhalb der Hauptresonanz, die stärksten bei Planquarzen bei ca.  $f_s + 40 \dots + 150$  kHz, bei Konvexquarzen bei ca.  $f_s + 200 \dots + 400$  kHz.

Bis zu Dämpfungen von 20 ... 30 dB können die Nebenresonanzen, die nicht auf der Flanke der Hauptresonanzkurve liegen, nach dem gleichen Passiv-Meßverfahren wie die Hauptresonanzen gemessen werden. Bei höheren Dämpfungen muß die Messung mit  $C_0$ -Kompensation durchgeführt werden.

Das nach der alten DIN 45105 Teil 4/ IEC-Publikation 283 übliche Verfahren verwendet dazu eine Schaltung mit Differentialübertrager, welche – wegen der unzureichenden Spezifikationen – allerdings keine reproduzierbare Ergebnisse liefert.

Etwas günstiger und reproduzierbarer ist die Verwendung eines  $180^\circ$ -Hybrid-Leistungsteilers anstelle des Differentialübertrages gemäß Abb. 14.

The achievable attenuation decreases with higher frequency and with higher orders of overtone. It is found generally that plano-parallel quartz resonators have better spurious attenuation than plano-convex or bi-convex resonators. In specifying spurious resonance parameters it is necessary to give an indication of both the acceptable attenuation level desired and their frequencies relative to the main resonance frequency.

In the AT-cut the (so-called) 'unharmonic resonances' exist only above the main resonance in the region of + 40 to + 150 kHz for plano parallel resonators between + 200 to + 400 kHz for biconvex or planoconvex resonators.

In the passive measurement method indicated above, spurious resonance attenuations up to 20 to 30 dB can be measured. With higher attenuations,  $C_0$  compensation is necessary.

The usual method, as specified in DIN 45105, part 4/1 EC publ. 283, utilizes the method with hybrid coils which because of insufficient specification does not produce reproducible results.

It is somewhat better and more reproducible to use a  $180^\circ$  hybrid power divider in place of the hybrid coil in accordance with Fig. 14.

La quantité et le niveau des raies parasites augmente avec l'élévation de la fréquence et du rang d'harmonique. Les quartz plans-parallèles ont un meilleur comportement que les quartz plans-convexes ou biconvexes. La seule amplitude des raies parasites n'est pas décisive; leur emplacement dans le spectre de fréquence joue un rôle important. En coupe AT, les résonances non harmoniques se trouvent au-dessus de la résonance principale. Les plus importantes sont entre + 40 et + 150 kHz pour les quartz plans et environ + 200 à + 400 kHz pour les quartz convexes.

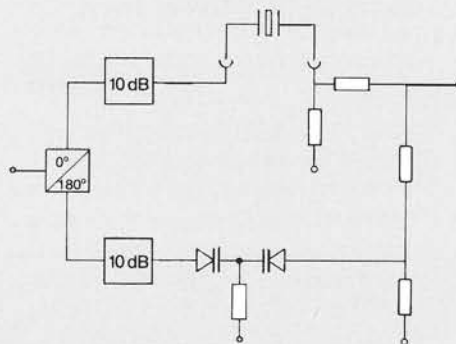
Lorsque l'atténuation des raies parasites n'excède pas 20 ou 30 dB, la mesure passive s'applique de la même manière que pour la résonance principale.

Lorsque l'atténuation est supérieure, il est nécessaire de recourir à la compensation du  $C_0$ .

L'ancienne publication CEI 283 proposait un montage employant des transformateurs différentiels dont la spécification trop floue engendrait des résultats aléatoires.

L'utilisation d'un diviseur de puissance hybride à  $180^\circ$  à la place du transformateur différentiel est un peu plus favorable et plus reproductible. (Voir la fig. 14).

Abb. 14/fig. 14



Eine exakte Bestimmung der Nebenresonanzen ist durch Anwendung des oben beschriebenen Ortskreisverfahrens nach (DIN) IEC 444-5 möglich. Eine Normung hierfür ist in Vorbereitung.

Using the above-described circle method in accordance with (DIN) IEC 444-5 permits precise determination of the spurious resonances. Standardization for this is currently in preparation.

Les raies parasites peuvent être déterminées avec précision en utilisant la méthode de transmission directe selon CEI 444-5 décrite précédemment. Une normalisation est en préparation.



## 9. Quarzbelastung

Die mechanische Schwingungsamplitude der Quarzscheibe ist proportional zur Amplitude des Wechselstroms. Die in  $R_1$  umgesetzte Verlustleistung ist  $P_c = I_q^2 R_1$ . Zu große Leistungen führen zur Zerstörung des Quarzvibrators bzw. der aufgedampften Metallelektrode. Die zerstörungsfreie Obergrenze liegt bei  $P_c \approx 10$  mW, bzw.  $I_c = 20$  mA.

Da die periodisch zwischen  $L_1$  und  $C_1$  als kinetische und potentielle Energie pendelnde Blindleistung  $Q_c = Q \cdot P_c$  erheblich größer ist (bei  $P_c = 1$  mW und einer Quarzgüte  $Q$  von 100.000 ist  $Q_c = 100$  W), kann die Schwingungsamplitude schon bei viel kleineren Quarzbelastungen den linearen Bereich einer harmonischen Schwingung überschreiten, wodurch sich die Resonanzfrequenz zu höheren Werten verschiebt und der Resonanzwiderstand sich erhöht. Diese Abhängigkeit ist bei Obertonschwingquarzen ausgeprägter als bei Grundwellenquarzen und bei Konvexquarzen stärker als bei Planquarzen. In Abb. 15 sind typische Verläufe gezeigt, wobei die exakte Vorbestimmung nicht möglich ist, da diese Abhängigkeit durch den Resonanzwiderstand, Quarzstrom, Elektrodengröße, Scheibendurchmesser, Befestigungsart usw. beeinflusst wird.

## 9. Drive level

The amplitude of mechanical vibration of the quartz resonator increases proportionally to the amplitude of the applied current. The power dissipated in the resonance resistance is given by  $P_c = I_q^2 R_1$ . High drive levels lead to the destruction of the resonator or the vaporisation of the evaporated electrodes. The upper limit for drive level is approximately 10 mW.

As the reactive power oscillating between  $L_1$  and  $C_1$  is represented by  $Q_c = Q \times P_c$ , for  $P_c = 1$  mW and with a  $Q$  of 100.000,  $Q_c$  is equal to 100 Watts. The oscillation amplitude can be exceeded with relatively low level of drive  $P_c$ , thus resulting in the crystal frequency moving upwards.

This frequency dependence on drive level is more pronounced with increasing overtone order. Figure 15 shows typical effects but exact prediction of the effect is not possible as it is influenced by all the elements of crystal design and operation i.e. mechanical blank parameters, electrode size, mounting arrangements and so on.

It can be seen that the drive level must

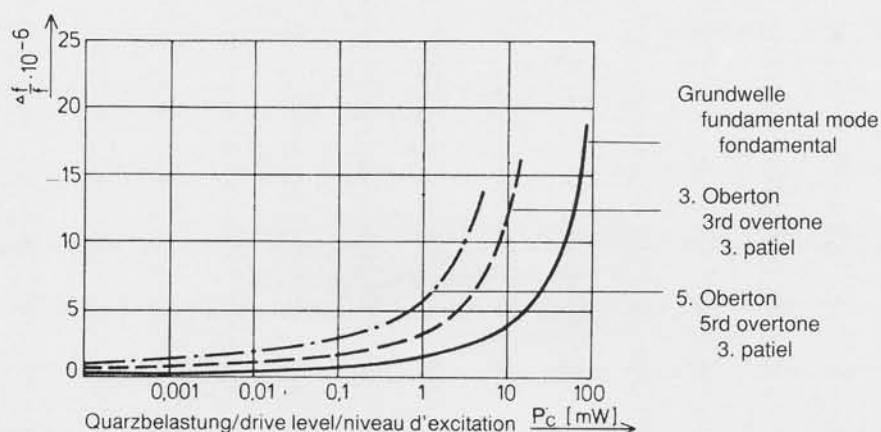
## 9. Niveau d'excitation

L'amplitude mécanique de la vibration de la lamelle de quartz est proportionnelle à l'amplitude du courant alternatif qui la parcourt. La puissance dissipée "dans  $R_1$ " est donnée par  $P_c = I_q^2 R_1$ . Une puissance trop importante conduit à la destruction du résonateur ou de ses électrodes; la limite de sécurité est d'environ 10 mW.

La puissance réactive  $Q_c = Q \cdot P_c$  dépasse très nettement cette valeur: pour  $P_c = 1$  mW et un facteur de surtension  $Q = 100.000$  par exemple, on obtient  $Q_c = 100$  W. On voit que pour un niveau d'excitation  $P_c$  relativement faible, l'amplitude de vibration peut facilement sortir du domaine linéaire, résultant en un décalage de la fréquence de résonance.

Les quartz fonctionnant sur une harmonique sont plus sensibles à ce phénomène que ceux en fondamentale, de même que les quartz convexes par opposition aux quartz plans. La fig. 15 illustre le déplacement de la fréquence de résonance en fonction du niveau d'excitation et du rang d'harmonique, mais ces courbes n'ont qu'une valeur indicative car elles ne rendent pas compte des effets d'autres facteurs tels que la résistance à la résonance, le courant qui parcourt le quartz, le diamètre des électrodes, le diamètre du résonateur, le type de suspension, etc.

Abb. 15/fig. 15





Es sollte deshalb die Quarzbelastung, bei der die Resonanzfrequenz gemessen werden soll, angegeben werden, um bei der Herstellung den Quarz schon bei der richtigen Belastung auf Sollfrequenz abgleichen zu können. Bedingt durch die heutigen Halbleiterschaltungen liegen allgemein die Quarzbelastungen bei ca. 0.1 bis 0.5 mW. Bei fehlenden Angaben werden die Schwingquarze bei 0.1 mW, entspricht 2 mA (bei 25  $\Omega$ ), auf ihre Sollfrequenz abgeglichen.

Von einem guten Schwingquarz erwartet man, daß der Resonanzwiderstand möglichst unabhängig von der Quarzbelastung ist, d.h. daß dieser auch bei sehr niedrigen Belastungen von etwa 1 nW nicht ansteigt. Bei den heute verwendeten Halbleiterschaltungen mit niedriger Leistungsaufnahme muß der Quarz auch bei sehr niedrigen Belastungen einwandfrei anschwingen, d.h. der Resonanzwiderstand darf den maximal zulässigen Wert, der durch die Oszillatorschaltung gegeben ist, im gesamten Bereich der Quarzbelastung nicht überschreiten.

Quarzvibratoren mit zu rauher Oberfläche, schlecht haftender Metallelektrode oder mit interner mechanischer Verspannung weisen einen belastungsabhängigen Resonanzwiderstand auf (Abb. 16).

be specified carefully, if there is to be good correlation between the frequency of the crystal at the end of its production and in the end use equipment.

Today with semiconductor oscillator circuits a drive level of approximately 0.1 mW appears normal, where this parameter is not specified, our production will use 0.1 mW.

A well performing crystal should start to oscillate easily and its frequency should be virtually independent of the variation of drive level from a starting level of about 1 nW. In today's semiconductor circuits with very low power consumption the crystal has to work well also at very low drive levels.

In fig. 16 we show the effect of crystals with and without the problem of frequency dependence on drive level.

Crystals that have badly adhering electrodes or on which the surface of the resonator is not fine enough, exhibit the curved effect i.e. at low drive levels they have higher resistance.

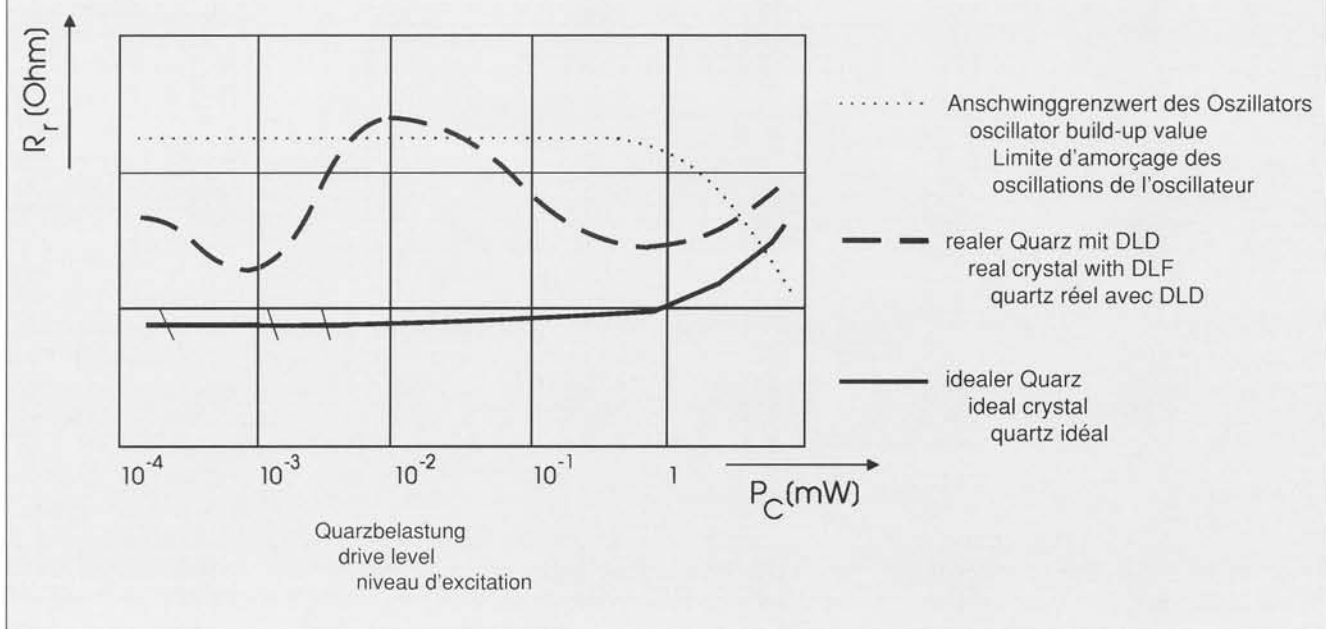
La spécification du quartz devra donc mentionner le niveau d'excitation auquel se fera le contrôle de fréquence afin que le fabricant prévoise en conséquence la fréquence à laquelle il doit caler le quartz.

Les circuits à semi-conducteurs actuels fonctionnent fréquemment avec 0.1 mW et c'est cette valeur que nous adoptions pour nos contrôles en l'absence de prescription contraire.

Un quartz de bonne qualité est supposé présenter une résistance à la résonance pratiquement indépendante du niveau d'excitation, et ce dès les plus faibles valeurs (1 nW): ceci est nécessaire pour les circuits semiconducteur avec. Très faible consommation.

Un mauvais comportement à cet égard est souvent dû à un résonateur dont la surface est trop rugueuse ou dont les électrodes adhèrent mal (fig. 16).

Abb. 16/fig. 16





Dieser Effekt wird als drive level dependence (DLD) bezeichnet. Für kritische Anwendungen sollte eine Kontrollmessung zunächst bei niedriger ( $1 \mu\text{W}$ ) und danach bei höherer Belastung ( $0.5 \text{ mW}$ ) durchgeführt werden. Messungen über eine größere Anzahl von Belastungswerten sind sehr zeitaufwendig.

Mit geeigneten Prüfoszillatoren ist eine schnelle Prüfung des DLD-Grenzwertes möglich, allerdings nur als Go/No-go-Test.

Die Messung der Belastungsabhängigkeit des Resonanzwiderstandes mit der Passivmeßtechnik nach (DIN) IEC 444 und mit der Oszillatormethode sind in dem IEC-Entwurf 248 enthalten.

Anschwingprobleme können sehr weitgehend durch eine Optimierung der Oszillatorschaltung beseitigt werden, in dem eine ausreichende Rückkopplungsreserve vorgesehen wird.

This effect is called the drive level dependence (DLD). Usually production tests of DLD are performed between 1 and 10 microwatts and then at 1 mW. Needless to say, making more measurements at intermediate levels increases crystal production costs considerably.

Using suitable test oscillators permits fast testing of the DLD limit value, but only in the form of a Go/No-go test. IEC Draft 248 covers measurement of the drive level dependence of the resonance impedance with a passive measurement technique in accordance with (DIN) IEC 444 and with the oscillator method.

Oscillation build-up problems can very largely be eliminated by optimizing the oscillator circuit by providing an sufficient feedback reserve.

Lorsque l'application le demande, on effectue une première mesure à faible niveau ( $1 \text{ à } 10 \mu\text{W}$ ) puis une seconde à niveau plus élevé ( $1 \text{ mW}$ ). La multiplication des points de mesure allonge considérablement le temps de contrôle, et donc son coût. La norme française NFC 93 - 611 décrit un essai à faible niveau applicable à certains types de quartz normalisés ("niveau réduit", § 3.2.4)

Mesurer un grand nombre de niveaux d'excitation prend beaucoup de temps.

La valeur limite DLD (Drive Level Dependence) peut être vérifiée rapidement avec des oscillateurs de contrôle adéquats, mais uniquement comme test Go/No-go.

La mesure du rapport entre le niveau d'excitation et la résistance à la résonance avec la technique de mesure passive suivant CEI 444 et avec la méthode de l'oscillateur figurent dans le projet CEI 248. Les problèmes d'amorçage des oscillations peuvent être supprimés dans une large mesure par une optimisation du circuit oscillateur obtenu en prévoyant une réserve de rétroaction suffisante.

## 10. Zeitliche Frequenzstabilität

Man unterscheidet zwischen der Kurzzeitstabilität (Bereich bis ca. 10 sec.), die mit dem Phasenrauschen verbunden ist, sowie der Langzeitstabilität (über Tage, Monate, Jahre), der sogenannten Alterung.

Die Kurzzeitstabilität hängt wesentlich von der Dimensionierung der Oszillatorschaltung ab. Erst bei einer ausreichend rauscharmen Schaltung kommt der Einfluß des Schwingquarzes zum Tragen.

Die Alterungsgrenze wird wesentlich beeinflusst von der Dichtheit des Quarzgehäuses (Schutzgasfüllung), der Sauberkeit (Kontamination) des Quarzinnengehäuses und Vibrators und der Stabilität der Metallelektrode. Die zeitliche Änderung der Resonanzfrequenz ist im allgemeinen anfangs stärker (logarithmischer Verlauf, Abb. 17).

## 10. Frequency variation as a function of time

This is normally considered in two ways. Short term stability (ie. in the range of up to 10 seconds) and long term stability over days, months or years, often called ageing.

The short term stability of a quartz crystal depends on the actual oscillator design and manufacture. Only at low drive levels the short term stability of the oscillator is totally controlled by the quartz crystal.

The ageing rate is substantially influenced by the cleanliness of the resonator, the stability of the inert gas filling and the security of the final sealing process. Ageing is naturally greater during the first part of the life of the crystal unit and follows the form shown in figure 17.

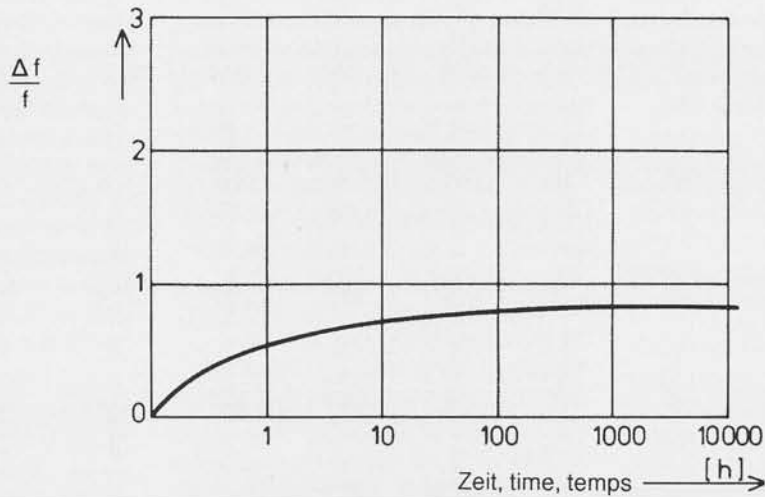
## 10. Variation de fréquence en fonction du temps

On distingue le domaine du courtterme (jusqu'à 10 secondes) où prédomine le bruit de phase et celui du long terme (jusqu'à quelques années) où l'on parle alors de vieillissement.

La stabilité à court terme dépend principalement de la conception de l'oscillateur. On ne s'intéressera à la stabilité propre du quartz qu'après s'être assuré de celle de l'oscillateur et l'avoir optimisée.

Les facteurs les plus importants pour le vieillissement d'un quartz sont l'étanchéité (gaz de remplissage) et la propreté (contamination) de l'intérieur du boîtier ainsi que la stabilité des électrodes. Le vieillissement est généralement plus rapide au début de la vie du quartz (courbe logarithmique, fig. 17).

Abb. 17/fig. 17



Es wird zwischen einer aktiven und einer passiven Alterung unterschieden. Unter aktiver Alterung versteht man die zeitliche Frequenzänderung des Schwingquarzes im Betriebszustand, d.h. eingebaut im Oszillator im Dauerlauf betrieben. Unter passiver Alterung versteht man die zeitliche Frequenzänderung des Schwingquarzes bei Lagerung. Um diese zu beschleunigen, kann die Lagerung bei höheren Temperaturen, z.B. 85° C erfolgen.

Die Angabe einer Alterungsrate ist nur sinnvoll, wenn neben der Alterungsrate pro Zeitabschnitt (Tag, Woche, Monat und Jahr) auch die Umgebungstemperatur und die Art der Alterung (aktiv/passiv) festgelegt wird.

Bei besonderen Anforderungen können mit AT-Quarzen im verschweißten Metallgehäuse Alterungsraten von kleiner 2 ppm/Jahr, in Sonderfällen bis zu 0.5 ppm/Jahr, erzielt werden. Höchste Stabilität wird mit Schwingquarzen im Allglas-Gehäuse erzielt (kleiner 0.1 ppm/Jahr). Die im praktischen Betrieb erzielte Alterung hängt sehr stark von der Quarzbelastung im Oszillator ab. Für geringe Alterung sollte eine möglichst kleine Quarzbelastung eingestellt werden (10  $\mu$ W). Dagegen ist für eine hohe Kurzzeitstabilität und geringes Phasenrauschen eine möglichst hohe Quarzbelastung (mehrere 100  $\mu$ W) anzustreben.

It is necessary to distinguish between active and passive ageing. Active ageing is the frequency shift, when the crystal works under operation conditions, i.e. permanently oscillating in the circuit. Passive ageing is the frequency shift during storage. For accelerated ageing storage can be accomplished at elevated temperatures, e.g. 85° C.

Ageing rate is only meaningful if defined either as 'in operation' and under defined drive and temperature conditions i.e. active, or in storage under defined temperature conditions i.e. passive.

Ageing rates of less than 2 ppm per year are normal for crystals sealed in metal holders, in special cases 0.5 ppm per year is possible. As small as possible a load (10  $\mu$ W) should be applied on the crystal for low aging. On the other hand, as high as possible a load (several 100  $\mu$ W) should be applied on the crystal for high short-term stability and low phase noise.

Le vieillissement peut être actif ou passif. Dans le premier cas, il s'agit de la variation de fréquence introduite par le fonctionnement ininterrompu dans l'oscillateur. Dans le second, on s'intéresse à l'évolution de la fréquence en phase de stockage. Le vieillissement actif peut être accéléré par un stockage à température élevée, 85° C par exemple.

L'indication d'un taux de vieillissement n'a de sens que lorsque l'on précise en plus la durée considérée (jour, semaine, mois ou année), la température ambiante et le type de vieillissement (actif ou passif).

Pour des quartz en coupe AT en boîtier métallique soudé électriquement, nous pouvons garantir un vieillissement inférieur à 2 ppm/an, et même dans certains cas 0.5 ppm/an. Le vieillissement réel dépend fortement du niveau d'excitation imposé par l'oscillateur qui doit être aussi faible que possible, en pratique 10  $\mu$ W à 100  $\mu$ W max. Au contraire, stabilité à court terme et faible bruit de phase réclament un fort niveau d'excitation, de l'ordre de plusieurs centaines de  $\mu$ W.

**11. Mechanische und klimatische Prüfungen**

Die im folgenden genannten Prüfungen können im Rahmen von Freigabeproofungen bei TELE-QUARZ durchgeführt werden. Sofern zwischen Hersteller und Anwender nichts anderes vereinbart wurde, gelten folgende Prüfbedingungen nach (DIN) IEC 122-1:

- a) **Schocken**  
Prüfung Ea nach (DIN) IEC 68-2-27, je 3 Schocks in den 3 Achsen, Halbsinus 100 g, 6 ms
- b) **Dauerschocken (Bumping)**  
Prüfung Eb nach (DIN) IEC 68-2-29, 4.000 Schocks in einer der 3 Achsen, Halbsinus 40 g, 6 ms
- c) **Schwingen, sinusförmig (Vibration)**  
Prüfung Fc nach (DIN) IEC 68-2-6, Teilprüfung B1: 10 ... 55 Hz Auslenkung  $\pm 0,75$  mm; 55 Hz ... 2 kHz, Beschleunigung 10 g, 1 Oktave pro Minute. Je 2 Stunden in den 3 Achsen.

Die zulässigen Änderungen bei den Tests a) bis c) sind jeweils:

**11. Mechanical and climatic tests**

The tests mentioned here can be carried out at TELE QUARZ as approval tests if no special conditions are agreed or specified the following tests conditions are assumed to apply according to IEC publication 122-1.

- a) **Shock:**  
Test Ea according to IEC 68-2-27, 3 shocks in each of the 3 axes, half sine 100 g, 6 ms.
- b) **Bump Test**  
Test Eb according to IEC 68-2-29, 4.000 bumps in one of the 3 axes, half sine 40 g, 6 ms.
- c) **Vibration (sinusoidal)**  
Test Fc according to IEC 68-2-6, test B 1: 10 ... 55 Hz amplitude  $\pm 0.75$  mm, 55 Hz ... 2 kHz, acceleration 10 g, 1 octave per minute. 2 hours in each of the three axes.

The permissible changes at the tests a) to c) are in each case:

**11. Essais climatiques et mécaniques**

A l'occasion de recettes de qualification ou de livraison, nos clients peuvent effectuer en nos ateliers les essais nommés ci-dessous. Sauf accords particuliers, nous appliquons les sévérités suivantes, en conformité avec les normes CEI et NF C 20 - 600:

- a) **Chocs**  
Essai 8B selon NF C 20 - 608, sévérité 100 A, ou CEI 68-2-27
- b) **Secousses**  
Essai 24A selon NF C 20-624, sévérité 40 A/4000, ou CEI 68-2-29
- c) **Vibrations**  
Essai Fc selon N F C 20 - 616, endurance par balayage: 10 à 55 Hz, amplitude  $\pm 0,75$  mm, 2 h/axe 55 Hz à 2 kHz, accélération 10 g, 1 octave/mn., 2 h/axe, ou CEI 68-2-6, essai B1.

Les variations occasionnées par chacun des essais resteront dans les limites:

$$\left| \frac{\Delta f}{f} \right| < 5 \text{ ppm} \quad \left| \frac{\Delta R_r}{R_r} \right| < 10\%$$

Für höhere mechanische Anforderungen verfügt TELE QUARZ über spezielle Quarzmontagearten.

For higher mechanical requirements, TELE QUARZ offers special crystal mounting methods (see chapter 4).

Nous pouvons répondre en cas de besoin à des exigences plus sévères, grace à l'emploi des suspensions spéciales mentionnées au chapitre 4.

- d) **Dichtheit**  
Die Dichtheit wird routinemäßig nach Prüfung Qk, Methode 2 in (DIN) IEC 68-2-17 im Restgas-Massenspektrometer geprüft. Qualitative Einzelprüfungen erfolgen auch mit dem Blasentest, Prüfung Qc, Methode 1 nach (DIN) IEC 68-2-17.

- d) **Leak test:**  
The leakage is tested as a matter of routine in accordance to test Qk, method 2 in IEC 68-2-17 in the residual gas mass spectrometer. Qualitative individual tests are also performed with the bubble test Qc, method 1 according to IEC 68-2-17.

- d) **Etanchéité**  
Nous effectuons ce test selon la norme NF C 20-631 (CEI 68-2-17), essai Qk avec gaz traceur et spectromètre de masse. Pour certains contrôles qualitatifs unitaires, nous appliquons également l'essai Qc (fuites de gaz).

- e) **Lötbarkeit**  
Schwingquarze mit Lötanschlüssen erfüllen die Prüfung Ta, Prüfmethode 1 nach (DIN) IEC 68-2-20, Lötbad ( $235 \pm 5$ ) °C.

- e) **Solderability**  
Crystals with solder connections comply with test Ta, testing method 1 of IEC 68-2-20 (soldering bath  $235 \pm 5$ ) °C.

- e) **Brasabilité**  
Nos quartz à sorties par fils satisfont à la norme NF C 20-630 (CEI 68-2-20), essai Ta, méthode 1 (bain d'alliage à  $235^\circ \text{C}$ )



Bei Sonderforderungen können andere Prüfungen nach (DIN) IEC 68, nach der BWB-Vorschrift VG 95210 oder den MIL-Vorschriften MIL-STD-202 F bzw. MIL-STD-883 C oder nationaler Normen herangezogen werden. Dies bedarf im Einzelfall der Abstimmung mit TELE QUARZ

## 12. Verarbeitungshinweise

Schwingquarze besitzen ein hermetisch dichtes Gehäuse, das mit Schutzgas gefüllt ist oder evakuiert ist. Wird ein Schwingquarz undicht, so daß Normalatmosphäre eindringen kann, können schwerwiegende Abweichungen der Quarzdaten entstehen. Die nachfolgenden Hinweise zeigen mögliche Probleme bei der Verarbeitung auf, die zu Undichtigkeit führen können.

### 1. Glasdurchführungen

- Die empfindlichste Stelle am Schwingquarz ist die Glasdurchführung. Beschädigungen können auftreten durch mechanische Überbelastung, wie zum Beispiel Biegen der Anschlußdrähte für liegende Montage. Zur Vermeidung von Mikrorissen muß der Draht zwischen Glasdurchführung und Biegestelle während des Biegevorgangs durch einen Niederhalter festgehalten werden. Kontrolle: Nach der Biegung keine ausgeplatzten Ränder an der Glasdurchführung.
- Das Rastermaß der Leiterplatte muß mit dem Quarzrastermaß übereinstimmen.  
HC-49/U-Gehäuse: 4.9 mm Raster  
HC-52/U-Gehäuse: 3.75 mm Raster  
Toleranz:  $\pm 0.2$  mm
- Bei der senkrechten Montage von Quarzen sollte die Bodenplatte des Quarzes auf der Leiterplatte aufliegen. Bei Abstand zwischen Platine und Quarz kann es bei Vibrationsbewegungen zu Ermüdungsbrüchen der Anschlußdrähte oder Beschädigung der Glasdurchführung kommen.

For specific requirements, other tests according to DIN IEC 68, or according to IEC-Publication 68, the BWB-regulation VG 95210 or MIL-STD-202 F, resp. MIL-STD 883 C or national standards can be applied. This needs in the individual case the coordination with TELE QUARZ.

## 12. Information on processing

Oscillator crystals have an hermetically sealed housing (enclosure) which is filled with inert gas or evacuated. If an oscillator crystal has a leak, thus permitting normal atmosphere to penetrate it, this may result in serious deviations in the crystal data. The following information relates to possible problems in processing which may lead to leaks.

### 1. Glass leadthroughs

- The most sensitive point on the oscillator crystal is the glass leadthrough. Damage may occur as the result of mechanical overload, such as bending the connection leads for horizontal mounting. In order to avoid microcracking, the wire must be held fixed in position by a pressure pad between glass leadthrough and the bending point during the bending process. Check: there should be no damaged edges on the glass leadthrough after bending.
- The center spacing of the PC board must correspond to the crystal center spacing.  
HC-49/U enclosure:  
4.9 mm center spacing  
HC-52/U enclosure:  
3.75 mm center spacing  
Tolerance:  $\pm 0.2$  mm
- If crystals are to be mounted vertically, the base of the crystal should contact the PC board flat. If there is a space between the PC board and the crystal this may result in fatigue fractures of the connection leads or damage to the glass leadthroughs if subject to vibration movements.

Le cas échéant, nous réalisons après accord préalable tout essai décrit par d'autres normes nationales, européennes ou internationales.

## 12. Mise en oeuvre

Les quartz possèdent un boîtier hermétique rempli de gaz protecteur ou sous-vide. Lorsqu'un quartz perd son étanchéité et qu'il peut donc être exposé à une atmosphère normale, ses caractéristiques peuvent changer considérablement. Les problèmes de mise en oeuvre pouvant entraîner une perte d'étanchéité sont indiqués ci-dessous.

### 1. Traversées de verre

- Les traversées de verre constituent le point le plus sensible du quartz. Elles peuvent être endommagées par une surcharge mécanique comme p. ex. lors de la flexion des fils de connexion en cas de montage à l'horizontale. Pendant la flexion, le fil doit être maintenu entre la traversée de verre et le point de flexion pour éviter les microfissures. Contrôle: après flexion, pas d'éclatement des bords de la traversée de verre.
- Le pas de la carte imprimée doit correspondre à celui du quartz.  
Boîtier HC-49/U: pas 4.9 mm  
Boîtier HC-52/U: pas 3.75 mm  
Tolérance:  $\pm 0.2$  mm
- En cas de montage vertical des quartz, l'embase doit reposer sur la carte. Dans le cas contraire, les vibrations peuvent entraîner des ruptures résultant de la fatigue des fils de connexion ou un endommagement des traversées de verre.



## 2. Löten und Ultraschallreinigen

- Die Schwingquarze von TELE QUARZ sind in der Lage, unter normalen Bedingungen zusammen mit anderen Bauteilen in gängigen Löt- und Reinigungsprozessen verarbeitet zu werden. Die Verarbeitungsbedingungen sind jedoch je nach Type und Toleranz mehr oder weniger begrenzt. Stimmen Sie im Zweifelsfall Ihre Verarbeitungsbedingungen mit uns ab.
- Ultraschallreinigen ist für Quarze bei Ultraschallfrequenzen bis 20 kHz bei den industriell üblichen Schallstärken nicht schädlich. Bei 40 kHz-Ultraschallbädern und hohem Schalldruck kann es bei empfindlichen Quarzen zu mechanischen Beschädigungen der Quarzscheibe kommen. Prüfen Sie dies im Zweifelsfall unter praktischen Bedingungen mit auf die Leiterplatte montierten Quarzen.

## 2. Soldering and ultrasonic cleaning

- TELE QUARZ oscillator crystals can be processed together with other components using conventional soldering and cleaning processes under normal conditions. However, the processing conditions are limited to a greater or lesser extent, dependent upon type and tolerance. In cases of doubt, please consult us about your processing conditions.
- Ultrasonic cleaning is not harmful to crystals at ultrasonic frequencies of 20 kHz at the sound intensities conventional in industry. Sensitive crystals may suffer mechanical damage of the crystal wafer if subjected to 40 kHz ultrasonic baths and high sound pressure. In cases of doubt, please conduct tests under practical conditions with crystals which have been mounted on the PC board.

## 2. Brasage et nettoyage par ultrasons

- Dans des conditions normales, les quartz de TELE QUARZ supportent les processus de brasage et de nettoyage usuels avec d'autres composants. Les conditions de mise en oeuvre sont cependant plus ou moins limitées selon le type et la tolérance. En cas de doute, nous consulter.
- Le nettoyage par ultrasons n'est pas nocif pour les quartz jusqu'à 20 kHz avec les niveaux sonores industriels habituels. Dans le cas des quartz sensibles, le nettoyage par ultrasons à une fréquence de 40 kHz sous une forte pression acoustique peut endommager mécaniquement la lamelle de quartz. En cas de doute, un essai en conditions réelles devra être effectué avec des quartz montés sur la carte imprimée.

## 13. Normen und Vorschriften für Schwingquarze

### (DIN) IEC Standards:

- (DIN) IEC 122: – Quartz crystal units for frequency control and selection.
- 122-1 (1976) Part 1: Standard values and test conditions. Amendment No. 1 (1983).
  - 122-2 (1983) Part 2: Guide to the use of quartz crystal units for frequency control and selection.
  - 122-2-1 (1991) Section One: Quartz crystal units for microprocessor clock supply.
  - 122-3 (1977) Part 3: Standard outlines and pin connections
    - Amendment No. 1 (1984)
    - Amendment No. 2 (1991)
    - Amendment No. 3 (1992)
    - Amendment No. 4 (1993)
- (DIN) IEC 283 (1968) Methods for the measurement of frequency and equivalent resistance of unwanted resonances of filter crystal units.
- (DIN) IEC 302 (1969) Standard definitions and methods of measurement for piezoelectric vibrators operating over the frequency range up to 30 MHz.
- (DIN) IEC 444: – Measurement of quartz crystal unit parameters by zero phase technique in a  $\pi$ -network.
- 444-1 (1986): Part 1: Basic method for the measurement of resonance frequency and resonance resistance of quartz crystal units by zero phase technique in a  $\pi$ -network.
  - 444-2 (1980) Part 2: Phase offset method for measurement of motional capacitance of quartz crystal units.
  - 444-3 (1986) Part 3: Basic method for the measurement of two terminal parameters of quartz crystal units up to 200 MHz by phase technique in a  $\pi$ -network with compensation of the parallel capacitance  $C_0$ .
  - 444-4 (1988) Part 4: Method for the measurement of the load resonance frequency  $f_L$ , load resonance resistance  $R_L$  and the calculation of other derived values of quartz crystal units, up to 30 MHz
  - 444-5 (1993) Part 5: Methods for measurement of quartz crystal devices for the determination of equivalent electrical parameters using automatic network analyser techniques and error correction
- (DIN) IEC 689 (1980) Measurements and test methods for 32 kHz quartz crystal units for wrist watches and standard values.
- (DIN) IEC 1080 (1991) Guide to the measurement of equivalent electrical parameters of quartz crystal units.

## 13. Standards for oscillator crystals

## 13. Normes concernant les quartz

- (DIN) IEC 1178-1 (1993) Quartz crystal units – A specification in the IEC Quality Assessment System for Electronic Components (IECQ) – Part 1: Generic specification.  
 1178-2 (1993) Part 2: Sectional specification – Capability approval.  
 1178-2-1 (1993) Part 2: Sectional specification – Capability approval – Section 1: Blank detail specification.  
 1178-3 (1993) Part 3: Sectional specification – Qualification approval.  
 1178-3-1 (1993) Part 3: Sectional specification – Qualification approval – Section 1: Blank detail specification.

Anmerkung: Alle bisherigen Normen DIN 45100 ff werden durch (DIN) IEC ersetzt.  
 Note: All previous standards DIN 45100 ff. are replaced by (DIN) IEC.

#### MIL-Standards:

- MIL-C-3098 H General specification for quartz crystal units  
 MIL-C-49468 General specification for precision quartz crystal units  
 MIL-H-10056 E General specifications for crystal holders (enclosures)

#### Normes francaises

- NF C 93-601 Boîtiers de quartz  
 NF C 93-611 Quartz oscillateurs, prescriptions générales  
 UTE E 93-611 Quartz oscillateurs, recueil des spécifications particulières  
 NF C 20-600 Essais généraux climatiques et mécaniques

#### CECC publications and European standards

CECC 68000 (EN 168000)	Fachgrundspezifikation: Schwingquarze	Generic specification: Quartz crystal units	Spécification générique: Résonateurs à Quartz
CECC 68100 (EN 168100)	Rahmenspezifikation: Schwingquarze	Sectional specification: Quartz crystal units	Spécification intermédiaire: Résonateurs à Quartz
CECC 68101 (EN 168101)	Vordruck für Bauart- spezifikation: Schwingquarze	Blank detail specification: Quartz crystal units	Spécifications particulière cadre: Resonateurs à Quartz
CECC 68200 (EN 168200)	Rahmenspezifikation: Schwingquarze (Bauart- zulassung)	Sectional specification: Quartz crystal units (Qualification approval)	Spécification intermédiaire: Résonateurs à Quartz (Homolo- gation)
CECC 68201 (EN 168201)	Vordruck für Bauartspezifikation: Schwingquarze (Bauartzulassung)	Blank detail specification: Quartz crystal units (Qualification approval)	Spécification particulière cadre: Résonateurs à Quartz (Homologation)
CECC 00200	Liste der zugelassenen Erzeugnisse	Qualified product list	Liste de produits homologues
CECC MUAHAG	Liste bevorzugter Produkte	Preferred product list	Liste préférentielle de composants électroniques