

Schwingquarz

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

Ein **Schwingquarz**, häufig vereinfachend abgekürzt als Quarz bezeichnet, ist ein elektronisches Bauelement in Quarzoszillatoren, welches zur Erzeugung von elektrischen Schwingungen mit einer bestimmten Frequenz dient. Seine Funktionsweise basiert dabei auf dem Prinzip der elektromechanischen Resonanz des verbauten piezoelektrischen und mit Elektroden versehenen Quarzkristalls.



Schwingquarz für eine Frequenz von 4 MHz

Inhaltsverzeichnis

- 1 Historisches
- 2 Allgemeines zum Aufbau und zur Funktion
- 3 Grundlagen
 - 3.1 Eigenschaften des Quarzkristalls
 - 3.2 Schwingungsformen
 - 3.3 Kristallschnitte
 - 3.4 Frequenzkonstante
- 4 Herstellung
 - 4.1 Synthetische Herstellung des Quarzkristalls
 - 4.2 Herstellen der Blanks
 - 4.3 Kontaktieren und Montage
- 5 Ersatzschaltung und elektrisches Verhalten
 - 5.1 Gütefaktor und Bandbreite
- 6 Anwendungen
- 7 Normung
- 8 Markt
- 9 Siehe auch
- 10 Literatur
- 11 Weblinks
- 12 Einzelnachweise

Historisches

Erste systematische und wissenschaftlich dokumentierte Versuche mit elektromechanischen Resonanzschwingungen führte Alexander M. Nicholson 1918 mit natürlich gewachsenen Seignettesalzkristallen durch.^[1] Bereits ein Jahr später ersetzte Walter Guyton Cady den Seignettesalzkristall durch den effektiveren und auch heute noch gebräuchlichen Quarzkristall.

Die Bell Telephone Laboratories und andere Forschungseinrichtungen trieben ab 1923 die Entwicklung von praxistauglichen Schwingquarzen^[2] hauptsächlich zur Frequenzstabilisierung in der Funktechnik voran und bewarben deren Einsatz in diversen zeitgenössischen Publikationen.^[3]

1928 entwickelte Warren Marrison, ein Mitarbeiter der Bell Telephone Laboratories, die erste quarzgesteuerte Uhr, die die Genauigkeit der Zeitmessung enorm erhöhte.^[4]

Ab 1934 konnten weniger temperaturabhängige Schwingquarze zur Frequenzstabilisierung mithilfe verfeinerter Kristallbearbeitungsverfahren (sogenannte Schnitte) hergestellt werden. Die hohe Feuchte-Empfindlichkeit und damit einhergehende unerwünschte Schwankungen der Resonanzfrequenz ließen sich jedoch erst Anfang der 1950er Jahre durch die Verwendung geschlossener Metall- oder Glasgehäuse deutlich verringern.

Während des Zweiten Weltkrieges führte der vermehrte Einsatz von militärischer Funktechnik zu einer erhöhten Nachfrage von Schwingquarzen, die durch natürliche Quarzkristalle allein nicht mehr gedeckt werden konnte und die Entwicklung von Verfahren zur Herstellung synthetischer Kristalle zur Folge hatte. Bereits 1948 erfolgte die Quarzsynthese in industriellem Maßstab. Weitere erwähnenswerte Verfeinerungen, insbesondere im Hinblick auf die Miniaturisierung der hergestellten Kristalle, wurden erst 1968 durch J. Staudte erzielt.



Niederfrequenz-Schwingquarz aus den 1960er Jahren in einer evakuierten Röhre mit einem damals üblichen Röhrensockel

Ab den 1950er Jahren ist durch die Einbeziehung sogenannter Oberschwingungen des Kristalls der steuerbare Frequenzbereich und damit auch der Einsatzbereich der Schwingquarze stark erweitert worden. Seitdem konzentriert sich die Entwicklung auf eine Reduzierung von Störeinflüssen, d. h. auf die Erhöhung der Güte.

Allgemeines zum Aufbau und zur Funktion

Der Quarzkristall wird beidseitig mit Elektroden versehen, an die ein von einem beliebigen Oszillator erzeugtes Wechselfeld angelegt wird. Durch Rückkopplung wird die Frequenz des Wechselfeldes mit der mechanischen Eigenfrequenz des Quarzkristalls in Übereinstimmung gebracht. Dadurch wirkt der Schwingquarz wie ein elektrischer Resonanzkreis mit sehr geringer Dämpfung (= sehr hohem Gütefaktor). Oszillatoren mit Schwingquarzen können, wenn sie entsprechend eingesetzt werden, Frequenzgenauigkeiten erreichen, die weit über die meisten Anforderungen der Industrie hinausgehen.

Der Schwingquarz führt im elektrischen Wechselfeld Deformationsschwingungen (Längs-, Dickenschers- oder Biegeschwingungen) aus, wenn die Frequenz des Wechselfeldes mit der Eigenfrequenz des Quarzplättchens übereinstimmt.

Ein Quarz kann in Serien- oder Parallelresonanz betrieben werden. Die beiden Eigenfrequenzen liegen sehr eng beieinander. Die Resonanzfrequenz lässt sich geringfügig auch durch die äußere Beschaltung beeinflussen. Häufig wird dazu ein Trimmer mit wenigen pF in Serie oder parallel zum Quarz geschaltet (abhängig davon, ob der Quarz in Serien- oder Parallelresonanz betrieben wird), um Herstellungstoleranzen ausgleichen zu können („Ziehen“ des Quarzes). Die elektrische Schaltung dieser speziellen Oszillatoren nennt sich Quarzoszillator.

Die Eigenfrequenzen des Quarzes sind in geringem Maße von der Temperatur abhängig. Der Temperaturkoeffizient lässt sich jedoch durch Wahl des *Quarzschnitts* (Geometrie in Bezug auf die Kristallachsen) beeinflussen, so dass er für die Verwendung als Zeitbasis sehr gering gehalten werden kann. Um Frequenzänderungen besonders gering zu halten, kann der Schwingquarz auch durch einen Quarzofen thermostatiert werden.

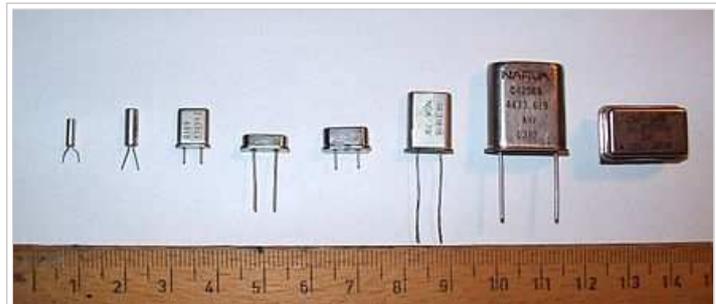
Grundlagen

Eigenschaften des Quarzkristalls

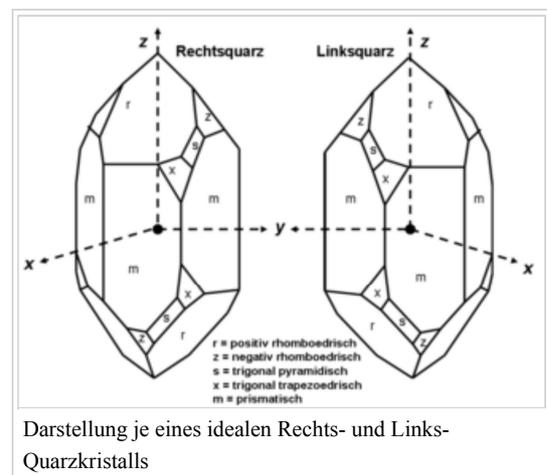
Das Basismaterial eines Schwingquarzes ist Quarz, die kristalline Form des Siliziumdioxids (SiO_2), das als Bergkristall natürlicherweise vorkommt. Quarzkristalle treten in einem trigonalen Kristallsystem in zwei Arten auf, als „Rechts-“ oder als „Linksquarz“.^{[5][6][7]}

Diese beiden Arten sind sich spiegelbildlich gleich. Der Querschnitt eines idealen Quarzkristalls ist sechseckig. Wie in der Kristallographie üblich, werden die 3 senkrecht aufeinander stehenden Achsen mit x, y und z definiert. Die z-Achse, auch optische Achse genannt, geht durch die Spitze des Kristalls. Die y-Achse verbindet zwei sich gegenüber liegende Seitenflächen des Kristalls miteinander und wird mechanische Achse genannt. Rechtwinklig zur y-Achse liegt die x-Achse, die sogenannte elektrische Achse, weil bei mechanischer Belastung des Kristalls in dieser Richtung eine elektrische Ladung auftritt (Piezoelektrizität). Allerdings treten bei Quarzkristallen zwei Kristallsysteme auf, das hexagonale Kristallsystem oberhalb von 573°C , das frei von piezoelektrischen Erscheinungen ist, und das trigonale Kristallsystem unterhalb von 573°C , die α -Modifikation des Quarzkristalls. Nur die α -Modifikation von Quarz hat piezoelektrische Eigenschaften.

Aus dem Quarzkristall wird nun ein Schwingquarz, wenn aus dem Kristall eine Scheibe oder ein quaderförmiges Plättchen in einer genau definierten kristallographischen Orientierung (Quarzschnitt) herausgeschnitten wird. Wird diese Scheibe oder das Plättchen mechanisch deformiert, so werden elektrische Ladungen auf seiner Oberfläche erzeugt. Dieser piezoelektrische Effekt, die Piezoelektrizität, ist auch umkehrbar, das heißt, wird ein elektrisches Feld an dieses Material gelegt, so verformt es sich (inverser Piezoeffekt). Sobald das elektrische Feld nicht mehr anliegt, nimmt das Material seine ursprüngliche Form wieder



Schwingquarze in verschiedenen Bauformen (ganz rechts ein Quarzoszillator mit integriertem Schwingquarz)

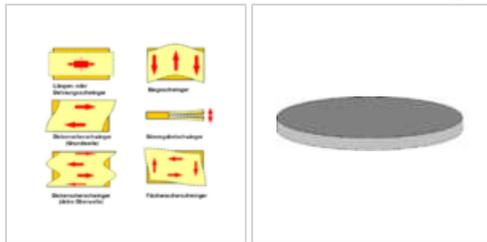


Darstellung je eines idealen Rechts- und Links-Quarzkristalls

an, wobei eine elektrische Spannung erzeugt wird. Die einmal durch Anlegen einer Spannung hervorgerufene mechanische Verformung am piezoelektrischen Kristall eines Schwingquarzes erzeugt nach dem Ausschalten der Spannung ein elektrisches Signal. Mittels einer Rückkopplungsschaltung kann dieses Signal für die Erzeugung einer mechanischen Resonanzschwingung des Materials genutzt werden, wobei wegen der sehr guten physikalischen Parameter des Siliziumoxids – zum Beispiel geringe Dämpfung des kristallinen Materials, außerordentlich gute mechanische und dynamische Stabilität und die geringe Temperaturabhängigkeit – ein sehr stabiles Taktsignal mit genauer Frequenz und definierter Amplitude entsteht. Durch die Wahl der Quarzschnitte und die jeweils erregte mechanische Schwingungsform ergeben sich darüber hinaus für bestimmte Frequenzbereiche typische elektrische Werte der Schwingquarze.

Schwingungsformen

Schwingungsmodi bei Kristallen für Schwingquarze



Schwingungsmodi von Quarzkristallen^[8] Deformations-schwingungen eines Dickenscherschwingers

Ein aus einem Quarzkristall herausgeschnittenes Quarzplättchen führt im elektrischen Wechselfeld Deformationsschwingungen aus, wenn die Frequenz des Wechselfeldes mit der Eigenfrequenz des Quarzplättchens übereinstimmt. Dieser Fall, die Resonanz, wird, wie bei allen mechanischen Schwingern, durch die Materialkonstanten und durch die mechanischen Abmessungen bestimmt. Die Deformationsschwingungen von Quarzresonatoren können in unterschiedlichen mechanischen Schwingungsformen auftreten.

Längenschwinger, auch **Dehnungsschwinger** genannt, sind plattenförmige Resonatoren, die in Richtung ihrer längeren Abmessung schwingen. Die Längenänderung wird durch ein elektrisches Wechselfeld, das senkrecht zur Schwingrichtung anliegt, hervorgerufen. Die auftretende Schwingung kann anschaulich auch mit einer akustischen Welle beschrieben werden, die im Zentrum des Resonators erzeugt wird. Diese Welle schreitet in Längsrichtung des Resonators fort. An den Enden des Resonators erfolgt eine Totalreflexion der Welle. Durch Überlagerung der hin- und rücklaufenden Welle entsteht im Resonanzfall eine stehende Welle, sofern die Resonatorlänge ein ganzes Vielfaches der halben Wellenlänge ist.

Biegeschwingungen in den **Biegeschwingern** können angeregt werden, indem Längenschwinger mit zwei gegenphasig angeschlossenen Elektroden versehen werden, so dass zwei entgegengesetzte Felder in x-Richtung auftreten. Hierdurch wird eine Biegung in z-Richtung erzwungen. Die Frequenzkonstante der meist quadratischen Kristallstäbe von Biegeschwingern wird von den Materialkonstanten und der Länge l und der Breite b des Resonators bestimmt, sodass für Biegeschwinger kein einheitlicher Zahlenwert angegeben werden kann. Längen- und Biegeschwinger werden zur Erzeugung von kleineren Frequenzen unterhalb 1 MHz eingesetzt.

Eine Sonderform der Biegeschwinger sind die **Stimmgabelschwinger**. Sie können mit dem Bild eines gebogenen Stabes erklärt werden, der Biegeschwingungen ausführt. Die Frequenz von Stimmgabelschwingern ist von der Zinkenlänge und Breite abhängig. Stimmgabelschwinger werden überwiegend zur Erzeugung von Uhrenfrequenzen eingesetzt.

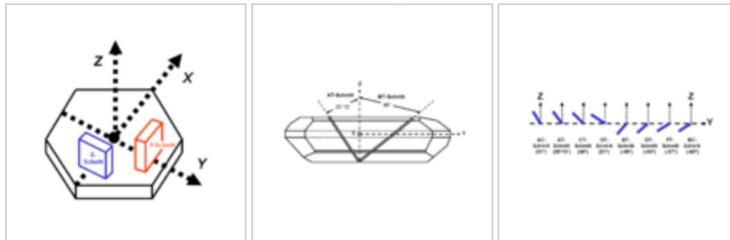
Die Schwingungen in **Dickenscherschwingern** ergeben sich aus gegenläufigen Verschiebungen der beiden größeren Oberflächenbereiche zueinander. Der oder – bei Oberwellenquarzen – die Schwingungsknoten befinden sich innerhalb des Resonators. Durch ein ausgeklügeltes Verhältnis des Resonatordurchmessers zur Dicke des Kristalls sowie zur Größe der Elektroden kann die Schwingungsenergie auf die Resonatormitte konzentriert werden, so dass am Resonatorumfang eine Halterung des Kristalls ermöglicht wird.^[9] Dickenscherschwinger sind aufgrund der Resonanzart besonders stabil gegenüber äußeren Einflüssen. Sie werden in der Schnittform des AT-Schnittes am häufigsten in Schwingquarzen eingesetzt und kommen praktisch für alle Frequenzen ab 1 MHz aufwärts zur Anwendung. Bis etwa 20 bis 30 MHz werden die Resonatoren in ihrer Grundwelle betrieben. Oberhalb 30 MHz bis etwa 250 MHz werden Dickenscherschwinger mit ihrer ungeraden Oberwelle bis hin zur 9. Oberwelle angeregt.

Die Resonanzschwingung in **Flächenschwingern** ergibt sich aus gegenläufigen Verschiebungen von je zwei Seitenflächenbereichen gegeneinander. Die Resonanzfrequenz der Flächenschwinger wird durch die Abmessungen der Kantenlängen der meist quadratischen oder rechteckigen Resonatoren und den richtungsabhängigen elastischen Werten des Kristalls bestimmt. Hieraus resultieren vom Kristallschnitt abhängige Frequenzkonstanten N mit bevorzugten Frequenzbereichen.

Kristallschnitte

Die Eigenschaften von Schwingquarzen wie die thermische Stabilität der Resonanzfrequenz, die internen Verluste und die Ziehbarkeit werden vom Schnittwinkel bestimmt, mit dem die Resonatorplättchen aus dem Quarzkristall herausgeschnitten werden. Durch den Schnittwinkel ist die Richtung der Kristallisation in einem Resonatorplättchen vorgegeben, womit die mechanischen Eigenschaften des Piezokristalls beeinflusst werden. Dies gilt auch für weitere Bauelemente wie z. B. Oberflächenwellenfilter (englisch *surface acoustic wave*, SAW), die mit Quarzkristallen als Basismaterial arbeiten.

Lage verschiedener Kristallschnitte im Quarzkristall

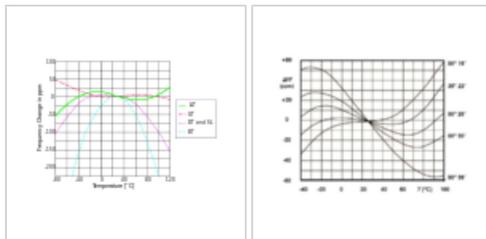


Lage der Koordinaten im Quarzkristall mit Darstellung der Lage des X- und des Y-Schnittes

Lage des AT- und des BT-Schnittes im Quarzkristall^[10]

Schnittwinkel verschiedener Kristallschnitte von Schwingquarzen

Die Lage der Schnitte im Quarzkristall wird mit Hilfe der geometrischen Achsen als Winkel zwischen X und Y und ggf. auch noch Z definiert. Jeder spezielle Schnitt wird mit einer Buchstabenkombination gekennzeichnet, wobei ein „T“ in dieser Kombination immer auf einen Temperatur-stabilisierten Schwingquarz hinweist.^[11]



Frequenzänderungen in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Kristallschnitten

Frequenzänderungen in Abhängigkeit von der Temperatur beim AT-Schnitt mit leicht geänderten Schnittwinkeln

Hauptunterscheidungsmerkmal der verschiedenen Kristallschnitte ist die unterschiedliche Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Temperatur. Dazu sind im linken oberen Bild die Frequenzänderungen im Temperaturbereich von -40 °C bis $+120\text{ °C}$ bei verschiedenen Kristallschnitten aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Kristallschnitte, bis auf den AT-Schnitt, die Kurvenform einer nach unten offenen Parabel aufweisen. Im Scheitelpunkt der Parabel besteht ein mehr oder weniger großer Temperaturbereich, in dem die Frequenzänderung verhältnismäßig gering ist. Der AT-Schnitt bildet dagegen einen sinus- oder S-förmigen Kurvenverlauf der Frequenzänderung über die Temperatur. Er kann so gelegt werden, dass der Kurvenverlauf am Wendepunkt der Sinuskurve den Temperaturbereich von -40 °C bis $+100\text{ °C}$ in der Weise abdeckt, dass die Frequenzänderung $\Delta f/f$ kleiner $\pm 30\text{ ppm}$ wird, wobei der Bereich am Wendepunkt bei etwa $25\text{ bis }35\text{ °C}$ liegt und dort im Idealfall so gut wie keine Frequenzänderung eintritt. Deshalb werden mehr als 90 % aller gefertigten Schwingquarze, mit Ausnahme der Stimmgabelquarze, mit Kristallen im AT-Schnitt hergestellt.^[12]

Der Standard-AT-Schnitt hat für Frequenzen bis 10 MHz einen Steigungswinkel des Kristallschnittes von $35^{\circ}15'$ der X-Achse gegenüber der optischen Z-Achse auf ($35^{\circ}18'$ für Frequenzen $> 10\text{ MHz}$). Wie das rechte obige Bild zeigt, kann mit einer geringen Änderung des Schnittwinkels der Kurvenverlauf deutlich beeinflusst werden. Damit kann der obere Wendepunkt der Frequenz-Änderungskurve in den höheren Temperaturbereich gelegt werden. Durch Aufheizen des Schwingquarzes kann der Arbeitspunkt in diesen Bereich gelegt werden, so dass die erzeugte Frequenz unabhängig von der Umgebungstemperatur wird. Dies wird bei den temperaturkompensierten Oszillatoren TCXO und OCXO ausgenutzt.

Die Frequenz eines Quarzkristalls in der Grundwelle hängt linear im umgekehrten Verhältnis von der Dicke des Plättchens ab. Das bedeutet, dass der mechanisch dünnste herstellbare Kristallschnitt die höchste Resonanzfrequenz bestimmt. Dieser Grenzwert liegt heutzutage (2010) bei etwa $50\ \mu\text{m}$. Die *Frequenzkonstante*, das ist die Dicke eines Plättchens, die eine Resonanzfrequenz von 1 MHz zur Folge hat, beträgt beispielsweise für AT-Schnitte 1,661 mm. Das heißt, dass mit einer Dicke des Quarzplättchens von $50\ \mu\text{m}$ eine Resonanzfrequenz von etwa 30 MHz erzeugt werden kann. Allerdings kann durch Strukturätzen des geschnittenen Kristalls mit der Inverted-Mesa-Technik die Dicke eines Quarzplättchens noch bis auf etwa $30\ \mu\text{m}$ verringert werden, so dass mit dieser speziellen Herstelltechnik eine obere Resonanzfrequenz der Grundwelle von 55,7 MHz erreicht werden kann.^[8]

Neben der Dicke eines Resonators sind die äußeren Abmessungen des Quarzplättchens bzw. der Quarzscheibe eine wichtige Größe. Sie bestimmen die Güte des Schwingquarzes, je größer die Abmessungen des Resonators sind, desto höher ist der Gütefaktor.^[8]

Neben den einfach gedrehten Schnitten durch den Kristall werden auch Schnitte durchgeführt, die doppelt gegenüber der X-Achse gedreht sind. Schnitte dieser Art sind oft für Sensoren bestimmt.

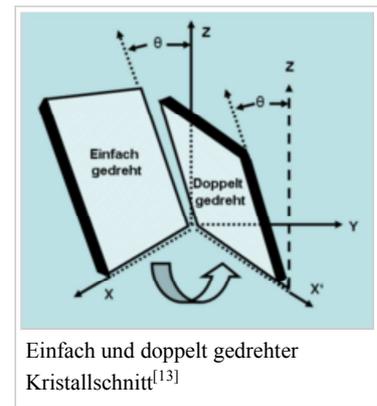


Tabelle der Kristallschnitte

Schnitt	Frequenzbereich	Schwingungs - modus	Schnittwinkel	Hinweise
----------------	------------------------	------------------------------------	----------------------	-----------------

Schnitt	Frequenzbereich	Schwingungs - modus	Schnittwinkel	Hinweise
Schnitt	Frequenzbereich	Schwingungs - modus	Schnittwinkel	Hinweise

Schnitt	Frequenzbereich	Schwingungs- modus	Schnittwinkel	Hinweise
AT	0,5–30 MHz (Grundton) 15...75 MHz (3. Oberton) 50...150 MHz (5. Oberton) 100...200 MHz (7. Oberton) 150...300 MHz (9. Oberton)	Dicken- scher- schwinger	35°15', 0° (< 25 MHz) 35°18', 0° (>10 MHz)	Vorteil des AT-Schnittes ist ein geringer und nahezu linearer Temperaturgang der Resonanzfrequenz bei etwa 25...35 °C. Durch geringe Änderungen des Schnittwinkels können AT-Resonatoren mit nahezu linearer Temperaturabhängigkeit der Frequenz bei höheren Temperaturen für temperaturkompensierte Oszillatoren (TCXO, OCXO) hergestellt werden. ^[14] AT-Quarze sind empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen, verursacht durch Vibration oder Stoß oder Temperaturwechsel.
SC	0,5...200 MHz	Dicken- scher- schwinger	35°15', 21°54' Doppelt gedreht	SC-Schnitt (SC = Stress Compensated) Vorteile des SC-Schnittes sind geringes Phasenrauschen und geringe Alterung. Der Frequenzgang ist bei 95 °C nahezu linear. SC-Resonatoren sind gegenüber AT-Resonatoren weniger empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen, verursacht durch Vibration, Stoß oder Temperaturwechsel, haben im Vakuumbetrieb eine höhere Güte und sind weniger empfindlich gegenüber der Einwirkung der Schwerkraft. Sie werden in der Raumfahrt und in GPS-Systemen in temperaturkompensierten Oszillatoren (TCXO, OCXO) eingesetzt. ^[15]
BT	0,5...200 MHz	Dicken- scher- schwinger	−49°8', 21°54'	Der BT-Schnitt hat bei 25 °C ähnliche Eigenschaften wie der AT-Schnitt. Wegen der gegenüber den AT- und SC-Schnitten dickeren Kristallplättchen können im BT-Schnitt Resonatoren für Frequenzen über 50 MHz im Grundton hergestellt werden. ^[16]
IT		Dicken- scher- schwinger	Doppelt gedreht	Der IT-Schnitt hat ähnliche Eigenschaften wie der SC-Schnitt. Der Frequenzgang bei 78 °C ist nahezu linear. IT-Resonatoren werden in temperaturkompensierten Oszillatoren (TCXO, OCXO) eingesetzt.
FC		Dicken- scher- schwinger	Doppelt gedreht	Der FC-Schnitt hat ähnliche Eigenschaften wie der SC-Schnitt. Der Frequenzgang ist bei 52 °C nahezu linear. Weil diese Temperatur niedriger ist als bei SC- und IT-Schnitten, gilt der FC-Schnitt als Energie sparende Version für temperaturkompensierte Oszillatoren (TCXO, OCXO). ^[17]
AK		Dicken- scher- schwinger	Doppelt gedreht	Der AK-Schnitt hat ein besseres Temperatur-Frequenzverhalten als AT- und BT-Schnitte mit einer höheren Toleranz gegenüber der Kristall-Orientierung als die AT-, BT- und SC-Schnitte. ^[18]
CT	300...900 kHz	Flächen- scher- schwinger	38°, 0°	Die Parabelöffnungskonstante a zwischen 0...+90 °C liegt bei etwa −0,05...−0,06 ppm/K ² . ^[6] Quarkristalle im CT-Schnitt werden meist für niedrige Frequenzen im kHz-Bereich verwendet, am häufigsten für Uhrenquarze und Funkuhrenquarze.
DT	75...800 kHz		−52°, 0°	Die Parabelöffnungskonstante a zwischen −10...+60 °C liegt bei etwa −0,02 ppm/K ² . ^[6]

Schnitt	Frequenzbereich	Schwingungs- modus	Schnittwinkel	Hinweise
		Flächenscher- schwinger		
SL	400...800 kHz	Flächenscher- schwinger	$-57^\circ, 0^\circ$	Die Parabelöffnungskonstante a zwischen $-10...+80^\circ\text{C}$ liegt bei etwa $-0,04\text{ ppm/K}^2$. ^[6]
GT	0,1...3 MHz	Längenschwinger	$51^\circ 7'$	Die Parabelöffnungskonstante a zwischen $-25...+75^\circ\text{C}$ ist nahezu Null.
E, 5°X	50...250 kHz	Längenschwinger		Der E-Schnitt hat einen sehr geringen Temperaturkoeffizienten. Er wird für Quarzfilter im niedrigen Frequenzbereich eingesetzt.
MT	40...200 kHz			
ET			$66^\circ 30'$	
FT			-57°	
NT	8...130 kHz	Biegeschwinger		Die Parabelöffnungskonstante a zwischen $10...50^\circ\text{C}$ liegt bei etwa $-0,05\text{ ppm/K}^2$. ^[6]
XY,	3...85 kHz	Biegeschwinger, Stimmgabel- schwinger		Der XY-Schnitt ist der am meisten verwendete Niederfrequenz-Schwingquarzschnitt. Er ist kleiner als andere Niederfrequenzschnitte, preiswerter herzustellen, hat eine niedrige Impedanz und ein geringes Co/C1-Verhältnis. Die Haupt-Applikation ist die Uhrenfrequenz 32,768 kHz. Die Parabelöffnungskonstante a zwischen $10...50^\circ\text{C}$ liegt bei etwa $0,04\text{ ppm/K}^2$. ^[6]
H	8...130 kHz	Biegeschwinger		Der H-Schnitt wird für Breitbandfilter verwendet. Er hat einen linearen Temperaturkoeffizienten. ^[19]
J	1...12 kHz	Längens- Biegeschwinger		Der J-Schnitt besteht aus einer Zusammenschaltung zweier Quarzplättchen zu einem Resonator. Die einzelnen Resonatoren werden so ausgewählt, dass die beiden Resonatoren bei einem gegebenen elektrischen Feld unterschiedliche Resonanzfrequenzen ausweisen. Dadurch entsteht eine sehr niederfrequente überlagerte Resonanz. ^[19]
RT			Doppelt gedreht	—
SBTC			Doppelt gedreht	—
TS			Doppelt gedreht	—
X 30°			Doppelt gedreht	—
LC		Dickenscher- schwinger	$11,17^\circ/9,39^\circ$ Doppelt gedreht	Der LC-Schnitt (LC = Linear Coefficient) besitzt einen linearen Temperaturkoeffizienten. Er kann als Sensor in Quarz-Thermometern verwendet werden. ^[20]
AC			31°	Der AC-Schnitt (Coupling = 0) zeichnet sich durch geringe Verkopplung zu anderen Schwingungsmodi aus und ist frei von Unstetigkeiten im Temperaturgang der Frequenz. Er kann als Sensor in Quarz-Thermometern verwendet werden. Der Temperaturkoeffizient beträgt 20 ppm/K . ^{[9][21]}
BC			-60°	Der BC-Schnitt kann als Sensor in Quarz-Thermometern verwendet werden.
NLSC				Der NLSC-Schnitt kann als Sensor in Quarz-Thermometern verwendet werden. Der Temperaturkoeffizient beträgt 14 ppm/K . ^[21]
Y				Der Y-Schnitt kann als Sensor in Quarz-Thermometern verwendet werden. Der Temperaturkoeffizient beträgt 90 ppm/K . ^{[22][21]}

Schnitt	Frequenzbereich	Schwingungs- - modus	Schnittwinkel	Hinweise
X	10...100 kHz 40...200 kHz	Biege- schwinger, Dehnungs- schwinger	0 0	Der X-Schnitt wurde im ersten Ultraschall-Quarzoszillator 1921 von W. G. Cady und im ersten 50-kHz-Oszillator für Uhren 1927 von Horton und Marrison verwendet. ^{[23][24]} Die Parabelöffnungskonstante a zwischen 0–45 °C liegt bei 0,04 ppm/K ² . ^[6]

Frequenzkonstante

Die Deformationsschwingungen, die ein Quarzkristall bei Resonanz im elektrischen Wechselfeld ausführt, wenn die Frequenz f des Wechselfeldes mit der Eigenfrequenz des Quarzplättchens übereinstimmt, wird, wie bei allen mechanischen Schwingern, durch die Materialkonstanten und durch die mechanischen Abmessungen bestimmt.

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

mit $l = l(x, y, z)$ und $E = E(x, y, z)$, worin l die Abmessung in Schwingungsrichtung, ρ die Dichte und E den Elastizitätsmodul bedeutet.

Der Ausdruck $N = fl = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

wird allgemein **Frequenzkonstante** oder auch **Schwingungskoeffizient** genannt und ist, wegen der Richtungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls, von der Schnittorientierung abhängig. Jeder Quarschnitt hat eine bestimmte Frequenzkonstante, die maßgebend für die Länge des Resonators in Schwingungsrichtung ist, oder anders ausgedrückt, die Frequenz eines Quarzkristalls in der Grundwelle hängt linear im umgekehrten Verhältnis von der Dicke des Plättchens ab. Das bedeutet, dass der mechanisch dünnste herstellbare Kristallschnitt die höchste Resonanzfrequenz bestimmt. Dieser Grenzwert liegt heutzutage (2010) bei etwa 50 μm .

Bei der Frequenzkonstante von 1661 kHz · mm beispielsweise für AT-Schnitte ergibt sich daraus, dass mit einer Dicke des Quarzplättchens von 50 μm eine Resonanzfrequenz von etwa 30 MHz erzeugt werden kann. Allerdings kann durch Strukturätzen des geschnittenen Kristalls mit der Inverted-Mesa-Technik die Dicke eines Quarzplättchens noch bis auf etwa 30 μm verringert werden, so dass mit dieser speziellen Herstelltechnik eine obere Resonanzfrequenz der Grundwelle von 55,7 MHz bei AT-Quarzen erreicht werden kann. Eine Übersicht über die Frequenzkonstanten verschiedener Quarschnitte gibt die folgende Tabelle:

Schwingungsform	Frequenzkonstante $N = f \cdot l$ ^{[6][19]}	Frequenzbereich
Dickenschwinger, AT-Schnitt	1661 kHz · mm	—
Dickenschwinger, SC-Schnitt	1797 kHz · mm	—
Dickenschwinger, BT-Schnitt	2536 kHz · mm	—
Längenschwinger, GT-Schnitt	2808 kHz · mm	—
Flächenschwinger, DT-Schnitt	2070 kHz · mm	180 bis 350 kHz
Flächenschwinger, CT-Schnitt	3070 kHz · mm	300 bis 1000 kHz
Flächenschwinger, SL-Schnitt	4600 kHz · mm	400 bis 800 kHz

Herstellung

Die Herstellung von Schwingquarzen erfolgt in mehreren nachfolgend beschriebenen Schritten, die zusammengefasst werden können in:

1. Synthetische Herstellung des Quarzkristalls
2. Herstellen der Blanks
3. Kontaktieren und Montage

Synthetische Herstellung des Quarzkristalls

Ursprünglich wurden Schwingquarze aus natürlich vorkommenden Quarzkristallen, auch Bergkristall genannt, hergestellt. Aber das natürliche Material bildet oft keinen idealen Kristall. Es treten Verzwillungen (Zwillingskristalle) auf, das sind Verwachsungen innerhalb des Kristalls, deren Hauptachsen nicht übereinstimmen. Weiterhin können solche Kristalle Wachstumsunterbrechungen, Gas- und Flüssigkeitseinschlüsse aufweisen, so dass in der Industrie mit den natürlich vorkommenden Kristallen eine Großserienfertigung nicht möglich ist. Die zur Herstellung von Schwingquarzen benötigten Kristalle werden deshalb schon seit den 1950er Jahren nach dem Hydrothermal-Prinzip synthetisch hergestellt. Hierbei wird die geologische Entstehung von Quarz in vertikalen Autoklaven nachgebildet.

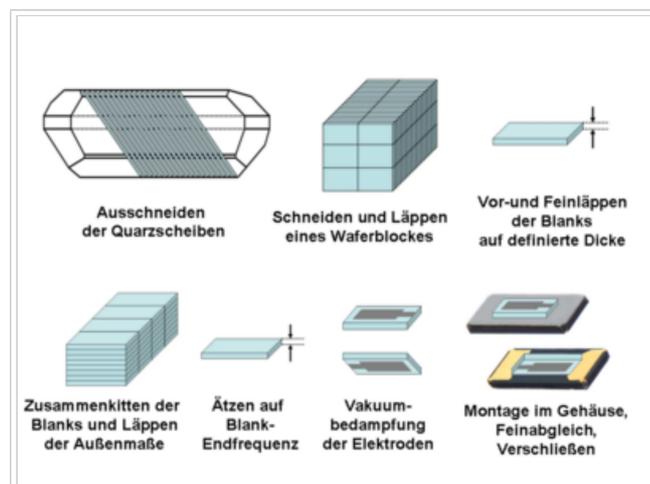


Synthetischer Quarz-Einkristall, etwa 190 mm lang und 127 g schwer

Der Autoklav ist im unteren Bereich mit einer Natriumhydroxid-Lösung gefüllt, in der sich feinverteilter Naturquarz bei etwa 400 °C und 800 bar unter Kieselsäurebildung bis zur Sättigung auflöst. Durch Wärmekonvektion strömt die übersättigte Lösung in den oberen Teil des Autoklaven und kristallisiert dort bei einer Temperatur von etwa 400 °C und 1000 bis 1500 bar^{[25][9]} an dort befindlichen Quarz-Impfkristallen (engl. *seed*) aus. Die abgekühlte Lösung sinkt wieder in den heißeren Bereich ab und nimmt erneut Kieselsäure auf. Es entsteht ein Kreislauf, der zum Wachsen von Quarz-Einkristallen mit einer Wachstumsrate von etwa 0,2 bis 1 mm pro Tag führt.^[8] Die Kristallbildung erfolgt überwiegend auf der Z-Fläche und ist frei von Verwachsungen und Verzwilligungen. Im Allgemeinen dauert der Wachstumsprozess etwa 40 bis 80 Tage und ergibt Einkristalle von etwa 200 mm Länge und einer Breite von bis zu 50 mm mit einem Gewicht von etwa 0,2 bis 1 kg. Die Weltjahresproduktion geht mittlerweile in die Millionen Tonnen.^[26]

Die synthetische Herstellung des Quarz-Einkristalls hat weitere Vorteile. Da die Zusammensetzung des Grundmaterials sehr genau bestimmt werden kann, kann die Reinheit des Kristalls, die entscheidend für die spätere Güte und die zeitliche Frequenzstabilität des Schwingquarzes ist, recht genau eingestellt werden. Zusatzstoffe, die ggf. die Wachstumsgeschwindigkeit erhöhen und deren Auswirkungen auf das Verhalten der Quarze bekannt sind, können somit präzise beigemischt werden.

Herstellen der Blanks



Schematischer Fertigungsablauf der Herstellung von SMD-Schwingquarzen

Die eigentliche Fertigung eines Schwingquarzes beginnt mit dem Herausschneiden eines Plättchens (Wafers) aus dem Quarzkristall in dem vorgesehenen Schnittwinkel. Zum Schneiden kommen Kreis- oder Bandsägen zum Einsatz. Die Messung der Schnittwinkel erfolgt über eine hochpräzise Röntgen-Messmethode.^{[27][28]} Mit dieser Methode kann der Schnittwinkel auf etwa eine Winkelminute genau eingestellt werden. Die herausgeschnittenen Plättchen werden „Wafer“ genannt. Sie haben zunächst noch nicht die Abmessungen des späteren Resonators. Dazu werden sie erst einmal zu einem Block zusammengefügt und dann so zurechtgeschnitten, dass durch Trennen die Abmessungen der späteren Quarzresonatoren, „Quarzblanks“ oder kurz „Blanks“ genannt, entstehen.

Nachdem der Waferblock an den zugänglichen Seitenflächen geschliffen und geläppt wurden, wird er anschließend in die gewünschte Größe der Blanks zersägt. Die einzelnen Blanks werden dann in mehreren Schritten auf die gewünschte Dicke geläppt. Hohe Präzisionsanforderungen bestehen dabei hinsichtlich möglichst geringer Oberflächen-Unebenheiten sowie einer genauen Plan-Parallelität der Oberflächen zueinander. Durch Zusammenfügen der Blanks zu einem Block können danach die äußeren Abmessungen der Blanks mit großer Gleichmäßigkeit in einer Großserie in Übereinstimmung gebracht werden.

Nach dem erneuten Trennen der Blanks voneinander werden dann die Resonatorplättchen mit Ätzverfahren auf eine etwas geringere Dicke gebracht, als es die gewünschte Frequenz des Schwingquarzes eigentlich erfordert. Denn durch die danach erfolgende metallische Beschichtung der Blanks, dem Aufbringen der Elektroden, kann die Resonanzfrequenz des Plättchens im Nachhinein noch beeinflusst werden.

Nachdem jetzt die Blanks die gewünschte Dicke besitzen, erfolgt je nach Größe und vorgesehener Frequenz eine Weiterbearbeitung. Für größere Bauformen werden die Blanks gerundet und die Scheiben ggf. mit einer Facette versehen. Kleinere Bauformen, insbesondere die für SMD-Quarze, bleiben in einer rechteckigen Form.

Kontaktieren und Montage

Es versteht sich von selbst, dass für Schwingquarze, die eine möglichst hohe Güte und Frequenzstabilität aufweisen müssen, hohe Anforderungen an die Reinheit, Sauberkeit und die Präzision der nachfolgenden Prozesse gestellt werden und in der Serienproduktion auch gewährleistet werden müssen. Sind die Quarzblanks in ihre mechanisch endgültigen Form gebracht, werden sie zunächst kontaktiert. Dies erfolgt in Vakuumkammern durch Aufdampfen von metallischen Elektroden, meist Silber, auf die Oberflächen der Blanks. Durch gleichzeitiges Messen der individuellen Resonanzfrequenz kann beim Aufdampfen der Elektroden die Schichtdicke noch leicht variiert werden, so dass hiermit eine Feinabstimmung der gewünschten Resonanzfrequenz durchgeführt werden kann.

Die metallisierten Resonatoren werden anschließend mit einer geeigneten Halterung elektrisch mit Anschlüssen, die nach außen geführt werden können, verbunden. Bei scheibenförmigen Resonatoren sind dies oft Federhalterungen, bei SMD-Schwingquarzen, aber auch bei liegend eingebauten Resonatoren erfolgt die Kontaktierung meist über eine Bondung.^[29]

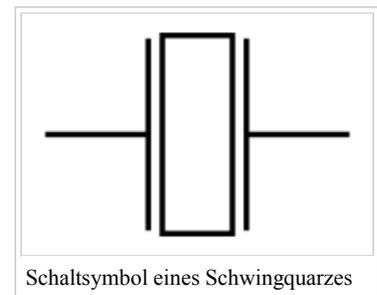


Metallisierter Quarzresonator, gehalten durch eine Federhalterung

Es folgt eine Lagerung des Resonators bei einer höheren Temperatur (200 °C),^[28] die eine Voralterung (engl. *aging*) des Quarzes bewirkt. Der kontaktierte und vorgealterte Resonator wird dann anschließend in einem evakuierten oder mit Stickstoff (N₂) gefüllten hermetisch dichten Gehäuse eingebaut, um Umwelteinflüsse und Oxidation durch Luftsauerstoff gering zu halten, somit günstiges Alterungsverhalten und langlebigen Einsatz bei hoher Stabilität zu gewährleisten. Endgemessen und beschriftet, sofern Platz genug auf dem Gehäuse zur Verfügung steht, kann er dann als Schwingquarz seine Funktion in elektronischen Geräten erfüllen.

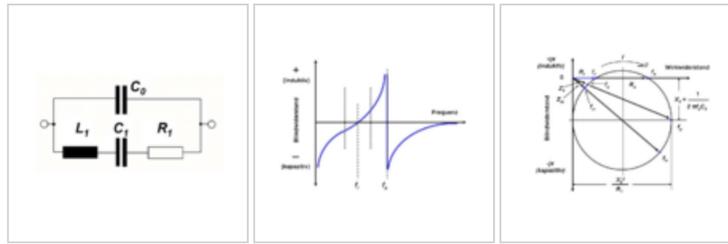
Ersatzschaltung und elektrisches Verhalten

Das elektrische Verhalten eines Schwingquarzes in der Nähe seiner Resonanzfrequenz entspricht einer Parallelschaltung, bestehend aus einem verlustbehafteten Serienresonanzkreis und einer statischen Parallelkapazität C_0 , die sich aus der Kapazität zwischen den Elektroden des Quarzes und den Streukapazitäten aus dem Halterungssystem zusammensetzt. Der verlustbehaftete Serienresonanzkreis besteht aus einer dynamischen Induktivität L_1 , einer dynamischen Kapazität C_1 und einem dynamischen Verlustwiderstand R_1 . Die dynamische Induktivität in dem Ersatzschaltbild entspricht der schwingenden Masse des Resonators und der Induktivität der Zuleitungen, die dynamische Kapazität entspricht der Elastizitätskonstanten des Quarzes und im dynamischen Verlustwiderstand sind die Verluste der inneren Reibung, die mechanischen Verluste im Halterungssystem und die akustischen Verluste in der Umgebung zusammengefasst. Für hohe Frequenzen muss das elektrische Ersatzschema noch durch einen Serienwiderstand für die ohmschen Verluste und eine Serieninduktivität für die elektrischen Anschlussleitungen erweitert werden.



Schaltssymbol eines Schwingquarzes

Erklärungen zum elektrischen Verhalten von Schwingquarzen



Vereinfachte elektrische
Ersatzschaltung eines
Schwingquarzes

Verlauf des
Blindwiderstandes eines
Schwingquarzes im
Bereich der
Resonanzfrequenz f_r
und der
Antiresonanzfrequenz f_a

Ortskurve des
Blindwiderstandes eines
Schwingquarzes

In der Darstellung der Ortskurve des Scheinwiderstandes eines Schwingquarzes können weitere Begriffe, die mit den Eigenschaften des Schwingquarzes zusammenhängen, anschaulich erklärt werden:

Die Resonanzfrequenz f_r tritt auf, wenn der Blindwiderstand X des Resonators gleich Null wird. Dazu gehört dann der Resonanzwiderstand R_r . Am hochohmigen Schnittpunkt des Ortskreises mit der reellen Achse befindet sich die Antiresonanzfrequenz f_a mit dem zugehörigen Widerstand R_a . Die Verlängerung des Vektors der Serienresonanzfrequenz f_s führt zur Parallelresonanz f_p , dem Punkt, an dem der Quotient des Quadrats des Blindwiderstands der Parallelkapazität bei Serienresonanz X_0 und dem Verlustwiderstand R_1 (X_0^2/R_1) am größten ist. Die Frequenz, bei der die Impedanz des Quarzes den minimalen Wert erreicht, ist die Minimalimpedanzfrequenz f_m . Die Stelle auf dem Ortskreis, an dem die Impedanz ihren Maximalwert erreicht, ist die Maximalimpedanzfrequenz f_n .

Die Ersatzschaltung des Schwingquarzes hat also zwei Resonanzfrequenzen, bei denen der Scheinwiderstand reell ist, der Phasenwinkel also Null beträgt: die Resonanzfrequenz f_r und die höhere Antiresonanzfrequenz f_a . Zahlenmäßig entspricht die Resonanzfrequenz f_r in etwa der Serienresonanzfrequenz f_s , also der Resonanzfrequenz, die sich aus der Serienschaltung der dynamischen Bauelemente des Kristalls ergibt. Die Antiresonanzfrequenz f_a wird dagegen oft mit der Parallelresonanzfrequenz f_p verwechselt. Der Wert der Serienresonanzfrequenz f_s ist unter Vernachlässigung des Verlustwiderstandes

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

Da die Ersatzschaltung des Schwingquarzes auch noch die parallel geschaltete statische Kapazität C_0 enthält, kann die Resonanz, unter Einbeziehung dieser Kapazität, auch als Parallelresonanzfrequenz f_p definiert werden:

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

Das Verhältnis der Parallelkapazität C_0 zur dynamischen Kapazität C_1 wird r genannt:

$$r = \frac{C_0}{C_1}$$

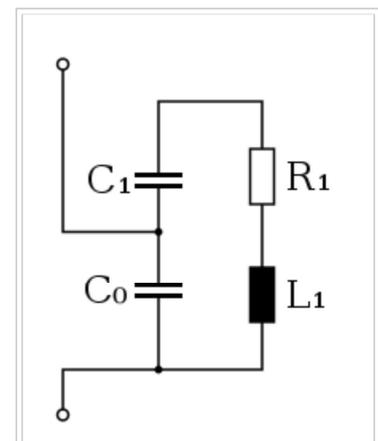
Der Abstand zwischen Serien- und Parallelresonanzfrequenz ist:

$$\frac{f_p^2 - f_s^2}{f_s^2} = \frac{C_1}{C_0} = \frac{1}{r}$$

Oder vereinfacht für große Werte ($r > 25$):

$$2\frac{f_p - f_s}{f_s} = \frac{1}{r}$$

Gütefaktor und Bandbreite



Schaltplan zur Verdeutlichung der
Parallelresonanz mit kapazitivem
Spannungsteiler

Der Gütefaktor Q eines Schwingquarzes, auch Schwingungsgüte genannt, kann, unter Vernachlässigung der statischen Kapazität C_0 , aus den Werten der dynamischen Kapazität C_1 , der dynamischen Induktivität L_1 und dem dynamischen Verlustwiderstand R_1 aus dem Ersatzschaltbild nach folgenden Formeln berechnet werden.

$$Q = \frac{1}{\omega C_1 R_1} = \frac{\omega L_1}{R_1} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Gegenüber üblichen LC-Resonanzkreisen sind bei Schwingquarzen die Werte der dynamischen Induktivität L_1 verhältnismäßig hoch, die der dynamischen Kapazität C_1 äußerst niedrig, und die Werte der dynamischen Verlustwiderstände R_1 bewegen sich im Bereich recht niedriger zweistelliger Ohm-Werte. Beispielsweise liegen die Werte bei einem handelsüblichen Schwingquarz mit 10 MHz bei $L_1 = 25$ mH, $C_1 = 0,01$ pF und $R_1 = 65$ Ω . Aus diesen Werten errechnet sich der für Schwingquarze übliche, im Vergleich zu LC-Kreisen recht hohe Gütefaktor von 25.000.

Die Bandbreite B einer Resonanzschaltung wird durch die Beziehung

$$B = \frac{f_r}{Q}$$

ausgedrückt. Bei dem obigen 10-MHz-Schwingquarz mit dem Gütefaktor 25.000 liegt somit die Bandbreite im Bereich von 400 Hz, wodurch die hohe Frequenzgenauigkeit von Schwingquarzen erklärt wird.

Anwendungen

Schwingquarze finden hauptsächlich Anwendung in der Elektrotechnik und Nachrichtentechnik und können über einen weiten Frequenzbereich hergestellt werden. Sie finden sich z. B. in praktisch allen Sendeanlagen, seltener in Empfängern, in Quarzuhren, als Taktgeber in Computern und Mikrocontrollern sowie in Frequenzzählern und digitalen Signalgeneratoren. Ebenso eignen sich Quarze zur Realisierung von Filtern.

Mit entsprechend geschnittenen Quarzen sind durch den Temperaturgang der Resonanzfrequenz sehr genaue Temperatursensoren herstellbar.

In Beschichtungsanlagen dienen frei aufgehängte Schwingquarze der Messung der erreichten Schichtdicke, indem die Änderung ihrer Resonanzfrequenz verfolgt wird, die durch die Massenzunahme infolge der auf dem Quarz entstehenden Schicht entsteht.

Wenngleich sich Quarze durch die mechanische Bearbeitung für beliebige Resonanzfrequenzen innerhalb eines zulässigen Intervalls herstellen lassen, haben sich handelsüblich einige wesentliche Frequenzen ergeben. Auszugsweise sind dies:

Frequenz in MHz	Primäre Anwendung
0,032768	Uhrenquarz in Echtzeituhren und elektromechanischen Quarzuhren in Form einer Stimmgabel; erlaubt eine Division durch 2^{15} , um einen Sekundenimpuls zu erhalten.
1,8432	Takt für UARTs; erlaubt ganzzahlige Divisionen zu üblichen Bitraten wie 9600 bps.
3,579545	Frequenz des Farbrägers in der US-Farbfernsehnorm NTSC. Aufgrund der weiten Verbreitung findet diese Frequenz auch bei dem Mehrfrequenzwahlverfahren im Telefoniebereich Anwendung.
3,686400	Takt für Mikrocontroller und UART; erlaubt ganzzahlige Divisionen zu üblichen Bitraten wie 9600 bps.
4,43361875	Frequenz des Farbrägers in der Farbfernsehnorm PAL.
10,245	Verwendet in älteren, analogen UKW-Radios, um die Zwischenfrequenz von 10,7 MHz auf 455 kHz zu mischen.
11,0592	Takt für Mikrocontroller und UART; erlaubt ganzzahlige Divisionen zu üblichen Bitraten wie 9600.
11,2896	Digitale Audiosysteme wie die Compact Disc (CD), welche mit einer Abtastrate von 44,1 kHz arbeiten.
12,0000	Verwendet bei USB-Geräten.
12,288	Digitale Audiosysteme wie Digital Audio Tape und Soundkarten, welche mit einer Abtastrate von 48 kHz arbeiten.
25,000	Anwendung bei Fast Ethernet und dem Media Independent Interface (MII).
27,000	Haupttakt bei digitalen Videogeräten wie DVD-Spielern.
33,33	Üblicher externer Takt für Hauptprozessoren vor der PLL

- Grundwellenquarz: Aufdruck in kHz^[30]

- Oberwellenquarz: Aufdruck in MHz

Normung

Die Normung von Schwingquarzen umfasst den gesamten Umfang der hierzu auftretenden Fragestellungen, angefangen vom synthetischen Quarzkristall über die Begriffe und die Anwendungen von Schwingquarzen bis hin zu den Messbedingungen zur Messung der elektrischen Parameter.

Die Definitionen und den Leitfaden zur Anwendung von synthetischen Quarzkristallen wird spezifiziert in der

- DIN EN 60758, Synthetischer Quarzkristall – Festlegungen und Leitfaden für die Anwendung

Die Grundbegriffe und die Definitionen für die Prüfungen der elektrischen Parameter der Schwingquarze sind festgelegt in der Fachgrundspezifikation sowie in den zugehörigen Rahmenspezifikationen:

- DIN EN 60122-1, Teil 1: Fachgrundspezifikation für Schwingquarze mit bewerteter Qualität
- DIN IEC 60122-2, Teil 2: Leitfaden zur Anwendung von Schwingquarzen zur Frequenzstabilisierung und -Selektion
- DIN IEC 60122-2-1, Teil 2: Leitfaden zur Anwendung von Schwingquarzen zur Frequenzstabilisierung und -Selektion zur Taktversorgung von Mikroprozessoren;
- DIN EN 60122-3, Teil 3: Norm-Gehäusemaße und Anschlussdrähte

Die Bedingungen für die Messvorschriften der elektrischen Parameter der Schwingquarze sind in den folgenden Normen festgelegt:

- DIN EN 60444-1, Messung der Resonanzfrequenz und des Resonanzwiderstandes von Schwingquarzen nach dem Null-Phasenverfahren in einem π -Netzwerk
- DIN EN 60444-2, Messung der dynamischen Kapazität von Schwingquarzen nach dem Phasenoffsetverfahren
- DIN EN 60444-3, Messung der Zwei-Pol-Parameter von Schwingquarzen bis 200 MHz mit Kompensation der Parallelkapazität C_0
- DIN EN 60444-4, Messung der Lastresonanzfrequenz f_L des Lastresonanzwiderstandes R_L und Berechnung anderer hergeleiteter Werte von Schwingquarzen bis 30 MHz
- DIN EN 60444-5, Meßverfahren zur Bestimmung der Ersatzschaltungsparameter von Schwingquarzen mit automatischer Netzwerkanalysator-technik und Fehlerkorrektur
- DIN EN 60444-6, Messung der Belastungsabhängigkeit (DLD)
- DIN EN 60444-7, Messung von Aktivitäts- und Frequenz-Dips von Schwingquarzen
- DIN EN 60444-8, Prüfaufbau für oberflächenmontierbare Schwingquarze
- DIN EN 60444-9, Messung der Nebenresonanzen von Schwingquarzen

Weitere Normen, die sich mit Bauelementen befassen, die direkt oder indirekt mit Schwingquarzen zusammen hängen, sind:

- DIN EN (IEC) 60679ff. Oszillatoren
- DIN EN (IEC) 60368ff. Quarzfilter
- DIN EN (IEC) 60862ff. & 61019ff. SAW-Filter & Resonatoren
- DIN EN (IEC) 61337ff. Dielektrische Resonatoren

Markt

Der Markt für Schwingquarze teilt sich auf in drei Bereiche. Einmal sind es die Schwingquarze als Einzelbauelemente, die von Anwendern separat in die entsprechenden Schaltungen eingebaut werden, zum anderen sind es die Quarzoszillatoren, die jeweils mit einem Quarzresonator, also einem Schwingquarz versehen sind. Die dritte Gruppe sind die sogenannten „Clock-Generatoren“, das sind die Stimmgabelquarze für Uhren. Es wird geschätzt, dass der weltweite Bedarf an Schwingquarzen im Jahre 2010 für jeden Bereich etwa den Wert von etwa 1,5 bis 1,8 Mrd. USD beträgt, so dass der Gesamtwert weltweit in etwa 4,5 bis 5,4 Mrd. USD beträgt.^[31]

Siehe auch

- Quarzkristall-Mikrowaage

Literatur

- Bernd Neubig, Wolfgang Briese: *Das große Quarzkochbuch*. Franzis', Feldkirchen 1997, ISBN 3-7723-5853-5 (online (<http://www.qsl.net/dk1ag/buch.html>)).

Weblinks

-  **Commons: Schwingquarz** ([//commons.wikimedia.org/wiki/Category:Crystal_oscillators?uselang=de](http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Crystal_oscillators?uselang=de)) – Sammlung von Bildern, Videos und Audiodateien
- Marvin E. Frerking, *Fifty Years of Progress in Quartz Crystal Frequency Standards* (<http://www.ieee-uffc.org/main/history.asp?file=frerking>) (1996, engl.)
- Warren A. Marrison, *The Evolution of the Quartz Crystal Clock* (<http://www.ieee-uffc.org/main/history.asp?file=marrison>) (1948, engl.)

Einzelnachweise

1. Patent US2212845 (http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?locale=de_EP&CC=US&NR=2212845): *Generating and transmitting electric currents*. Angemeldet am 10. April 1918, veröffentlicht am 27. August 1940, Erfinder: Alexander M. Nicholson.
2. *A History of the Quartz Crystal Industry in the USA*. Virgil E. Bottom, from the Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium 1981.
3. Die erste Veröffentlichung über den praktischen Aufbau von Quarzoszillatoren erschien 1924 in: H. S. Shaw: *Oscillating Crystals*. In: *QST Magazine* Vol. XI, Nr. 7, 1924 (vgl. online (http://www.bliley.net/XTAL/Industry-Hams.html#_Hlk390359570)). Siehe auch P. R. J. Brown: *The influence of amateur radio on the development of the commercial market for quartz piezoelectric resonators in the United States*. In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Frequency Control Symposium, 1996. 50th*. IEEE, 1996, ISBN 0-7803-3309-8, doi:10.1109/FREQ.1996.559819 (<http://dx.doi.org/10.1109%2FFREQ.1996.559819>).
4. Warren A. Marrison: *The Evolution of the Quartz Crystal Clock*. In: *The Bell System Technical Journal*. Vol. XXVII, 1948, S. 510–588 (Reprint online (<http://www.ieee-uffc.org/main/history.asp?file=marrison>)).
5. *Der Schwingquarz*. Valvo-GmbH Hamburg, April 1964.
6. Bernd Neubig, Wolfgang Briese: *Das Grosse Quarzkochbuch*. Franzis-Verlag, Feldkirchen 1997, ISBN 3-7723-5853-5. Kapitel 2 (<http://www.qsl.net/dk1ag/Kap2.pdf>) (PDF; 1,6 MB)
7. QUARTZ CRYSTAL, THE TIMING MATERIAL, Fortiming Corporation [1] (<http://www.4timing.com/techquartz.htm>)
8. Bernd Neubig: *Moderne Technologien bei Schwingquarzen und Quarzoszillatoren*. (<http://www.axtal.com/data/publ/fhka.pdf>)
9. W. Briese: *Eigenschaften von Schwingquarzen* (<http://www.axtal.com/data/buch/Kap2.pdf>)
10. AT cut, [2] (http://www.icmfg.com/glossary.html#AT_cut)
11. Darstellung von Quarzschnitten [3] (<http://www.mazepath.com/uncleal/quartz.gif>)
12. Crystals and oscillators, Jerry A. Lichter (PDF (<http://www.nelfc.com/pdf/pdfapp/9113.pdf>))
13. Crystal Technology, 4timing.com [4] (<http://www.4timing.com/techcrystal.htm>)
14. Crystal and frequency control glossary, Icmfg.com. [5] (http://www.icmfg.com/glossary.html#AT_cut)
15. Paul W. Kruse, David Dale Skatrud: *Uncooled infrared imaging arrays and systems*. Academic Press, 1997, ISBN 0-12-752155-0, S. 273 (eingeschränkte Vorschau (http://books.google.de/books?id=5zXS_By-nQ8C&pg=PA273#v=onepage) in der *Google Buchsuche*).
16. Crystals and oscillators, Jerry A. Lichter (PDF (<http://www.nelfc.com/pdf/pdfapp/9113.pdf>))
17. Patent US4985687 (http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?locale=de_EP&CC=US&NR=4985687): *Low power temperature-controlled frequency-stabilized oscillator*.
18. Patent US4499395 (http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?locale=de_EP&CC=US&NR=4499395): *Cut angles for quartz crystal resonators*.
19. Jerry A. Lichter: *Crystals and oscillators* (<http://www.nelfc.com/pdf/pdfapp/9113.pdf>) (PDF; 176 kB).
20. Patent US4419600 (http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?locale=de_EP&CC=US&NR=4419600): *Stress-compensated quartz resonators*.
21. Patent US5686779 (http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?locale=de_EP&CC=US&NR=5686779): *High sensitivity temperature sensor and sensor array*.
22. Y Cut Crystal (http://www.engineersedge.com/engineering/Engineering_Terms_Glossary/Y/y_cut_crystal_4074.htm). Engineersedge.com (25. August 2009).
23. UFFC|History (<http://www.ieee-uffc.org/main/history.asp?file=frerking>). Ieee-uffc.org (23. März 1959).
24. Glossary of terms used in the quartz oscillator-plate industry (http://www.minsocam.org/ammin/AM30/AM30_461.pdf) (PDF; 521 kB)
25. All about Quartz Devices [6] (http://www.kds.info/html/products/device/index_en.htm)
26. Martin Wucherer, Achim Krumrein: *Quarze & Quarzoszillatoren*. (http://mitglied.multimania.de/logicanalyzer/Vortrag_Quarze.pdf) (PDF; 2,0 MB)
27. Quartz Crystal Basics: From Raw Materials to Oscillators, Ken Hennessy, NDK America, Inc (PDF (http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Dec07/HFE1207_Tutorial.pdf))
28. *Wintron plant tour*. (<http://www.wintron.cn/plant.htm>)
29. Frequency Electronics, Inc., Tutorial, Precision Frequency Generation (PDF (http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/precision_frequency_generation.pdf))
30. Frank Sichla - HF-Technik mit dem NE/SA612 - beam-Verlag - ISBN 978-3-88976-054-8

31. Karin Zühlke: *Unser Ziel ist es, den Quarz obsolet werden zu lassen.*

(http://www.elektroniknet.de/bauelemente/news/article/28142/0/Unser_Ziel_ist_den_Quarz_obsolet_werden_zu_lassen/)
In: *Markt & Technik*. Nr. 27, 2. Juli 2010. (Interview mit Markus Lutz von *SiTime*)

Von „<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schwingquarz&oldid=122583127>“

Kategorien: Passives Bauelement | Uhrentechnik

- Diese Seite wurde zuletzt am 16. September 2013 um 10:56 Uhr geändert.
- Abrufstatistik

Der Text ist unter der Lizenz „Creative Commons Attribution/Share Alike“ verfügbar; Informationen zum Lizenzstatus eingebundener Mediendateien (etwa Bilder oder Videos) können im Regelfall durch Anklicken dieser abgerufen werden. Möglicherweise unterliegen die Inhalte jeweils zusätzlichen Bedingungen. Durch die Nutzung dieser Website erklären Sie sich mit den Nutzungsbedingungen und der Datenschutzrichtlinie einverstanden. Wikipedia® ist eine eingetragene Marke der Wikimedia Foundation Inc.