



elektronik informationen

effizienter entwickeln

KOMMUNIKATION

Was man braucht, um Produkte mit USB-C-Funktionen auszustatten | 52

BILDERVERARBEITUNG

Wie Computational Imaging Kameras verbessert und mehr Details sichtbar macht | 60

SPEZIAL: FAHRZEUG-ELEKTRONIK

MEMS kontra Solidstate - Lidar-Varianten im Überblick | 36



QUARZE & OSZILLATOREN

Was beim Spezifizieren von Taktbausteinen zu beachten ist | 20

Über
35.000
ADI
PRODUKTE
AUF LAGER

▶ ANALOG
DEVICES

LIZENZIIERTER
DISTRIBUTOR



[digikey.de/adi](https://www.digikey.de/adi)



Synchron im Ton

Oszillatoren – Entstehung, Funktionsweise und Spezifikation. Taktbausteine unter Zeitdruck in letzter Minute auszusuchen, ist gängige Praxis, führt aber selten zu einem guten Resultat. Eine rechtzeitige und gründliche Spezifikation kann helfen: Was Sie über Frequency Control Products wissen sollten.

Oszillatoren nutzen die mechanische Resonanz eines piezoelektrischen Materials, in den meisten Fällen eines Quarzkristalls, um ein Taktsignal von stabiler Frequenz in Form einer logikkompatiblen Rechteckschwingung zu erzeugen. Dieses Signal synchronisiert weitere Komponenten eines Systems und ist damit existenziell wichtig für das Endprodukt. Frequenzgebende Produkte, wie Schwingquarze und Oszillatoren, werden

heute für die meisten Schaltungen benötigt, und nahezu täglich kommen neue Anwendungen hinzu.

So entstehen Quarzprodukte

Künstlich erzeugte Quarze sind der häufigste Ausgangspunkt für Oszillatoren – mehr dazu auch im **Wissenskasten**. Mittels Hydrothermalsynthese erfolgt die Quarzzucht aus einer wässrigen Lösung in großen Autoklaven bei Temperaturen

zwischen 350 und 400 °C sowie Drücken zwischen 100 und 120 MPa. Als Nährstoff dienen Bruchstücke natürlicher Quarzkristalle, die sich unter diesen Bedingungen langsam auflösen. Aufgrund des Temperaturgefälles, welches in den Autoklaven aufrechterhalten wird, reichert sich gelöster Quarz in den Wachstumszonen der Autoklaven an, um dort zu Quarzkristallen von hoher Reinheit und Qualität heranzuwachsen.

Bevor die Kristalle in Wafer geschnitten werden, ist zunächst die Lage der kristallografischen Achsen – beziehungsweise die kristallografische Orientierung – zu ermitteln. Dafür kommen Röntgengoniometer zum Einsatz. Da die Temperaturstabilität des Quarzes vom Schnittwinkel abhängt, ist eine präzise Schnittführung wichtig. 90 % aller Quarze erhalten den sogenannten AT-Schnitt unter einem Winkel von 35° 15' zur z-Achse des ursprünglichen Barrens.

FAZIT

Oszillator-Grundlagen. Oszillatoren sind vom Hersteller optimierte Komplettlösungen und bieten Anwendern kürzere Entwicklungszeiten und somit meist deutliche Einsparungen. Ob Quarz- oder MEMS-Oszillator – ein zuverlässiger Taktgeber muss gründlich spezifiziert sein, damit Entwickler das bestgeeignete frequenzgebende Bauteil finden können. Die wesentlichen Parameter dafür sind Bauform, Frequenz, Stabilität, Strombedarf, Ausgangssignal und Arbeitstemperaturbereich. Anspruchsvollere Applikationen stellen aber meist noch höhere Anforderungen bezüglich Stabilität, Phasenrauschen, Vibrationsempfindlichkeit, Lebensdauer und Alterungseigenschaften, die es ebenfalls zu beachten gilt.

Das Schneiden der Rohquarzbarren erfolgt mithilfe von Mehrblattsägen, welche mit einem Laserrefraktometer in Verbindung mit einer Befestigungs- und Klebevorrichtung ausgestattet sein können. Die Quarzbarren lassen sich damit, gegeneinander kristallografisch ausgerichtet, zusammenkleben und dann in Endprodukte mit Abweichungen von etwa zehn Winkelsekunden – dem 360. Teil eines Grads – schneiden.

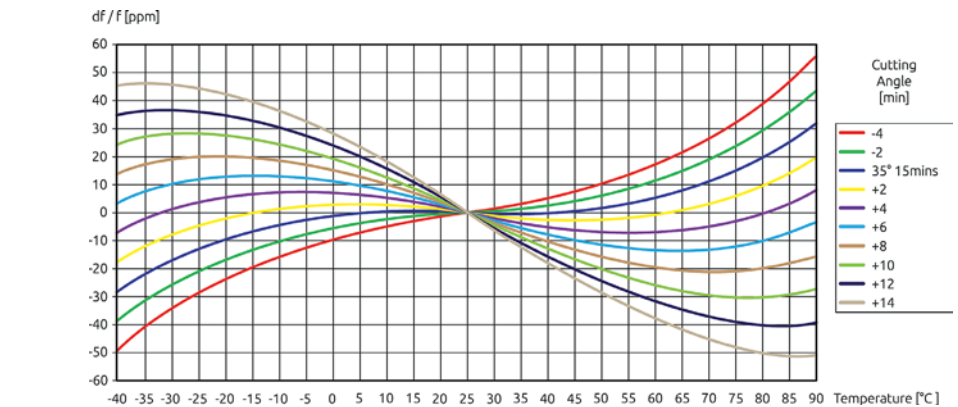
Der Verlauf der Temperaturkurve von Quarzen mit AT-Schnitt entspricht in etwa der Potenzfunktion $f(x) = x^3$. Abweichungen des Schnittwinkels wirken sich auf den Verlauf der Kurve und die Frequenzstabilität des Endprodukts aus (Bild 1).

Um Quarze zu gewinnen, die den hohen Anforderungen in Bezug auf die Winkelgenauigkeit entsprechen, müssen größere Mengen produziert sowie später kontrolliert und sortiert werden (Bild 2). Quarze, die hier aus der Toleranz fallen,

Wird die Spezifizierung von Taktgebern unterschätzt, sind Auswahl und Beschaffung nur selten von Erfolg gekrönt

werden für Anwendungen mit breiter gefassten Spezifikationen genutzt. Quarzfabriken haben daher häufig eine ganze Bibliothek an Quarzscheiben, sogenannten Blanks, vorrätig.

Sind die Blanks gefertigt (Bild 3), muss die Frequenz eingestellt werden, mit der



1 | Frequenzgang: Temperaturkurve eines Quarzes mit AT-Schnitt

der Quarz schwingen soll. Sie ist umgekehrt proportional zu dessen Masse. Bei Blanks im AT-Schnitt ist die Schwingfrequenz der Teile etwa gleich dem Quotienten aus 1680 und der Dicke in Millimeter. Ein 10-MHz-Quarz muss beispielsweise geschliffen, geläppt, geätzt und poliert

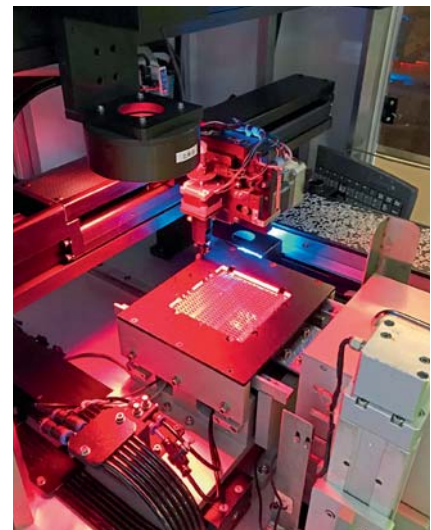
verursachen können. Typischerweise beträgt die höchste noch für die praktische Anwendung herstellbare Grundfrequenz etwa 40 MHz. Allerdings gibt es eine Reihe von Techniken, mit denen sich auch höhere Frequenzen erzeugen lassen.

Eine Methode ist, den Quarz mit einem Oberton seiner Grundfrequenz zu betreiben. Wie bei allen Schwingensystemen gibt es harmonische Schwingungen mit ungeraden Vielfachen des Grundmodus. Wird die Oszillatorschaltung um einen geeigneten Filter ergänzt, welcher die Grundfrequenz unterdrücken kann, so lässt sich ein Betriebsmodus höherer Frequenz erzeugen. Hierbei ist zu bedenken, dass die Stabilität mit jedem weiteren Obertonmodus geringer und damit die Schaltung anfälliger wird. Auch mittels einer Multiplikatorschaltung lässt sich aus einem niederfrequenten Quarz eine Hochfrequenzschaltung herstellen. Das Problem dabei

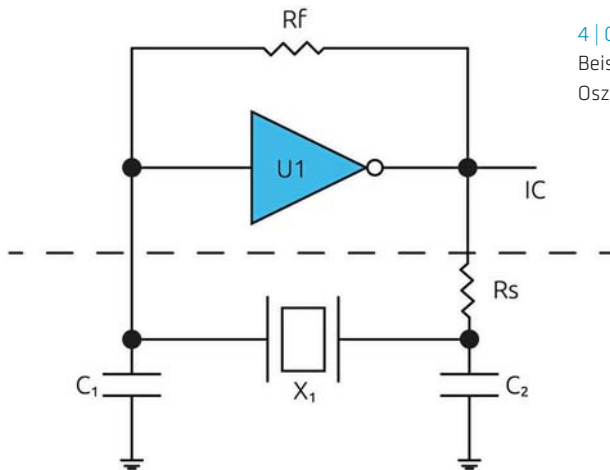
werden, bis die Dicke etwa 0,168 mm beträgt. Bei jedem Verarbeitungsschritt können Absplinterungen, Risse, Kratzer oder Parallelitätsverlust auftreten, die zu Fehlfunktionen des Endprodukts führen und Störsignale oder unter bestimmten Umständen plötzliche Frequenzänderungen



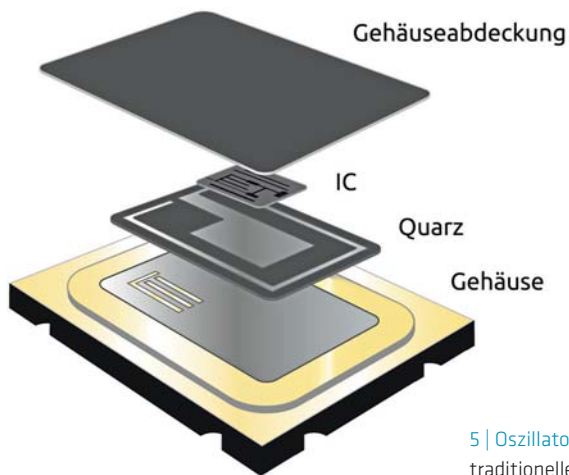
2 | Winkelsortierer: Quarze, die hier aus der Toleranz fallen, werden für Anwendungen mit breiter gefassten Spezifikationen genutzt



3 | Blanks: Die Quarzscheiben werden für weitere Produktionsschritte vorbereitet



4 | Oszillatorschaltung:
Beispiel des Pierce-Gate-
Oszillators



5 | Oszillator: Aufbau eines
traditionellen Quarzoszillators

ist, dass solche Schaltungen mehr Strom brauchen und eine deutlich längere Anschwingdauer besitzen und sich überdies ungünstig auf das Rauschverhalten auswirken. Um Frequenzen von bis zu 800 MHz zu erreichen, werden bei den meisten Standardquarzoszillatoren optimierte Schaltungen verwendet, die beide Methoden nutzen.

Der Weg zum Oszillator

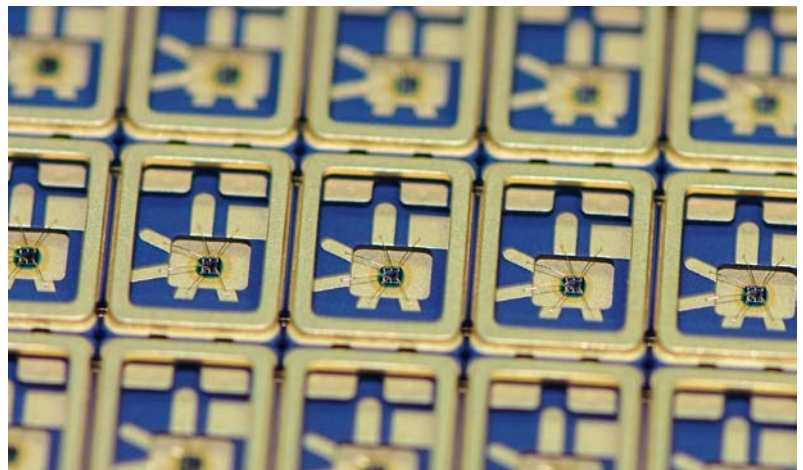
Der Schwingquarz allein dient einzig dazu, die Frequenz festzulegen. Um eine quarzbasierte Oszillatorschaltung – ver-

einfacht Quarzoszillator – darzustellen, muss er beschaltet werden (Bild 4 bis 6). Die Schwingung wird in einer Quarzoszillatorschaltung aufrechterhalten, indem das vom sogenannten Quarzresonator aufgenommene Spannungssignal verstärkt und per Rückkopplung an den Re-

sonator zurückgeführt wird. Der Resonator besteht aus zwei elektrisch leitenden Platten, zwischen denen sich ein Quarzblank befindet. Mithilfe eines Steuerungsschaltkreises wird ein Feld erzeugt, welches den Quarz in ein instabiles Gleichgewicht bringt und somit die Oszillation in Gang setzt. Die positive Rückkopplung im System verstärkt jedes Signal – sie erhöht die Amplitude der Oszillation. Dabei wirkt der Resonator wie ein Frequenzfilter, der nur für ein sehr schmales Frequenzband um die Eigenfrequenz des Quarzes durchlässig ist.

Umweltfaktoren wie Temperatur, Feuchtigkeit, Druck und Vibration können die Resonanzfrequenz eines Quarzes beeinflussen. Um die Auswirkungen zu minimieren, haben die Hersteller temperaturkompensierte und temperaturstabilisierte Quarzoszillatoren (TCXOs beziehungsweise OCXOs) entwickelt, die eine hohe Signalstabilität gewährleisten.

Neben den bewährten quarzbasierten gibt es immer mehr MEMS-Oszillatoren. Hier wird anstelle des Schwingquarzes ein MEMS-Resonator aus Polysilizium eingesetzt, das im Gegensatz zu Quarz nicht piezoelektrisch ist. Grundlage des Resonators ist stattdessen eine mechanische Struktur, die in einem Halbleiterprozess auf einem Siliziumwafer hergestellt wird (Bild 7). Die Seitenwände der MEMS-Resonatorstruktur bilden eine Kapazität gegenüber den äußeren feststehenden Elektroden. Über ein elektrisches Feld wird der nur 250 µm große Resonator zum Schwingen angeregt. MEMS-Oszillatoren arbeiten immer mit einer indirekten Frequenzerzeugung. Dazu verfügt der Oszillator-ASIC über eine programmierbare



6 | Innenleben: Gebondete Dies im Oszillatorgehäuse

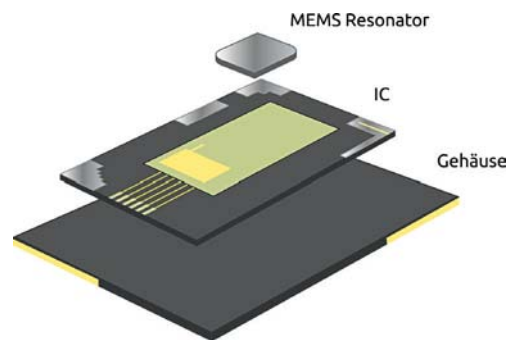
KONTAKT

WDI AG,
Industriestraße 25a,
Industriezentrum,
22880 Wedel (Holstein),
Tel. 04103 1800-0,
Fax 04103 1800-200,
www.wdi.ag

WISSENSWERT

Quarz-Retrospektive. Das piezoelektrische Phänomen – also die Fähigkeit eines Materials, unter Druck eine Spannung zu erzeugen – hatten die Brüder Jacques und Pierre Curie im Jahr 1880 entdeckt. Dies war die Grundlage für die Entwicklung des ersten Kristalloszillators, zuerst noch unter Verwendung von Kristallen des Rochellesalzes, 1917 durch Alexander M. Nicholson in den Bell Telephone Laboratories. Den Quarzoszillator baute Walter Guyton Cady im Jahr 1921. Dessen Herzstück bildet der Schwingquarz, welcher mithilfe des piezoelektrischen Effekts in Schwingung versetzt wird. Gelangt ein elektrischer Impuls über die aufgedampften Elektroden an das Quarzplättchen (Siliziumdioxid, SiO₂), verformt sich das Kristallgitter. Dies wiederum hat eine Ladungsverschiebung zur Folge, die ihrerseits ein elektrisches Signal in Form einer Spannung bewirkt. Verstärkt durch einen Inverter (Rückkopplung), fängt der Quarz unter bestimmten Bedingungen an, auf seiner Resonanzfrequenz zu schwingen. Die Frequenz wird dabei maßgeblich von der Größe, Dicke und Form des Quarzkristallblättchens, auch Blank genannt, sowie von den Materialkonstanten bestimmt.

In den 1920er- und 1930er-Jahren führte die Erfindung des Radios und dessen Verbreitung sowie der flächendeckende Aufbau von Radiosendern zu einer kommerziellen Nachfrage nach diesen Quarzoszillatoren. Zuvor kontrollierten Radiosender ihre Frequenz mit abgestimmten Schaltkreisen, die die Frequenz leicht um 3 bis 4 kHz absenken konnten. Sendern wurden Frequenzen zugewiesen, die aber nur 10 kHz voneinander entfernt waren, sodass es aufgrund von Frequenzdrift häufig zu Überlappungen zwischen ihnen kam. Dank der hervorragenden Frequenzstabilität der quarzbasierten Oszillatoren wurde das Problem der Frequenzdrift zwischen den Stationen gelöst und ein besseres Hörerlebnis ermöglicht. Mit dem Beginn des digitalen Zeitalters in den 1950er-Jahren stieg die Nachfrage drastisch an, und ein kommerzielles Verfahren zur Züchtung synthetischer Quarze musste her. Dieses wurde schließlich ebenfalls in den Bell Labs entwickelt und ermöglichte es, den enormen Bedarf an Quarzen für Oszillatorschaltungen zuverlässig zu decken.



7 | MEMS-Oszillator: Die mechanische Struktur auf einem Siliziumwafer wird über ein elektrisches Feld zum Schwingen angeregt

10⁻¹¹) sowie ein geringes Phasenrauschen und kleineren Jitter aus. Langjährige Erfahrungen zeigen, dass bei hochwertigen Quarzoszillatoren in Bezug auf Langzeitstabilität, Alterungsverhalten und Zuverlässigkeit nicht mit nennenswerten Abweichungen zu rechnen ist. Sie eignen sich daher unter anderem hervorragend für viele Anwendungen in der Telekommunikation, Datenübertragung sowie Audio- und Messtechnik.

Auf die korrekte Spezifizierung kommt es an

Sowohl der Auswahl- als auch der Beschaffungsprozess des richtigen Taktgebers wird oft unterschätzt, was dazu führt, dass in letzter Minute und unter Zeitdruck ein halbwegs passendes Bauteil ausge-

PLL, die Ausgangsfrequenzen beispielsweise zwischen 1 und 150 MHz bei einer Schrittweite von typischerweise 100 Hz generiert.

MEMS- sind wie Quarzoszillatoren für die meisten Standardanwendungen geeignet. Jedoch ist zu beachten, dass sie ein vergleichsweise hohes Phasenrauschen und einen größeren Jitter aufweisen können. Andererseits überzeugen sie mit einer geringeren Anfälligkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen und einer sehr hohen Vibrationsfestigkeit bis 10000g und mehr. Letztere ist dadurch bedingt, dass die Masse eines MEMS-Resonators nur ungefähr einem Tausendstel bis Dreitausendstel der Masse eines Quarzresonators entspricht. Dies bedeutet, dass eine gegebene Beschleunigung aufgrund von Schock oder Vibration bei einer MEMS-Struktur zu einer viel geringeren Kraft als bei einem Quarzresonator führt und daher eine viel niedrigere Frequenzverschiebung hervorruft. Die hohe mechanische Belastbarkeit ist der wesentliche Vorteil der MEMS-Oszillatoren. Somit sind sie konstruktionsbedingt besser geeignet für Anwendungen mit hoher Schock- und Vi-

brationsbelastung als viele Quarzoszillatoren.

Diese wiederum zeichnen sich durch Ihre sehr gute Kurzzeitstabilität (10⁻⁹ bis

	Schwingquarze	Oszillatoren
Notwendige Angaben	Bauform (SMD oder bedrahtet, Abmessungen)	Bauform (SMD oder bedrahtet, Abmessungen)
	Frequenz in kHz oder MHz	Frequenz in kHz oder MHz
	Arbeitstemperaturbereich in °C	Arbeitstemperaturbereich in °C
	Frequenztoleranz bei +25 °C in ppm	Frequenzstabilität über den Arbeitstemperaturbereich in ppm
	Frequenzstabilität über den Arbeitstemperaturbereich in ppm	Ausgangssignal (HCMOS, LVPECL, LVDS usw.)
Wünschenswerte Angaben (wenn bekannt)	Lastkapazität in pF	Versorgungsspannung (5V, 3,3V, 1,8V usw.)
	Empfehlung des IC-Herstellers, vollständige Typen-/Herstellerbezeichnung	vollständige Typen-/Herstellerbezeichnung
	Maximaler ESR in Ω	Jitter (max./typ.) in ps
	Ziehbarkeit (Pullability) in ppm/pF (über definierten Bereich in pF)	Symmetrie (40/60, 45/55)
	Schwingungsart (Grundton/Oberton)	Anschwungzeit (Rise & Fall Time) in ns

A | Spezifikation: Notwendige und wünschenswerte Angaben zu Schwingquarzen und Oszillatoren

wählt wird. Diese Methode ist nur selten von Erfolg gekrönt. Wenn dann beispielsweise die benötigte Frequenz nicht in der gewünschten Bauform erhältlich ist, können umständliche und kostenintensive Anpassungen der Schaltung notwendig werden. Es gilt: Ein zuverlässig funktionierender Taktgeber will gründlich und ausreichend spezifiziert sein (**Tabelle A**), damit am Ende das optimale frequenzgebende Bauteil ausgewählt und verwendet werden kann.

Für die meisten preissensitiven Anwendungen werden die Anforderungen an die Oszillatoren im Wesentlichen durch die Bauform, die Frequenz, die Stabilität, den Strombedarf, das benötigte Ausgangssignal und den gewünschten Arbeitstemperaturbereich bestimmt. Anwendungen wie Messgeräte, Satellitennavigation, Avionik oder Telekommunika-

tion stellen aber noch wesentlich höhere Anforderungen an die Oszillatoren – darunter eine sehr gute Stabilität, sehr geringes Phasenrauschen, gegebenenfalls eine sehr geringe Vibrationsempfindlichkeit und eine lange Lebensdauer. Hierfür muss der im Oszillator verwendete Quarz über verbesserte Alterungseigenschaften verfügen, um die erwartete Gesamtleistung erzielen zu können. Um dem anfänglichen Alterungseffekt entgegenzuwirken, durchlaufen alle Oszillatoren einen künstlichen Alterungsprozess, das sogenannte Pre-Aging. Ihre endgültige Stabilität erreichen sie erst nach einigen Tagen Betrieb.

Auch für günstigere Anwendungen gelten fertige Oszillatoren inzwischen immer häufiger als bevorzugte Frequenzgeber, bieten sie dem Entwickler doch eine werksseitig optimierte Komplettlösung.

Sämtliche für eine Oszillatorschaltung benötigten Komponenten sind in einem kompakten Gehäuse vereint und aufeinander abgestimmt. Die Anschwingsicherheit ist immer gewährleistet, und im Vergleich zu einer Oszillatorschaltung mit Quarz und diskreten Bauteilen entfällt die aufwändige Abstimmung zur Optimierung der Schaltung. Das bedeutet für den Anwender vereinfachte und verkürzte Entwicklungszyklen und somit meist auch massive Einsparungen. ml

Autor

Hendrik Nielsen ist im Produktmarketing FCP bei WDI tätig.

Online-Service

Link zum WDI-Quarzfinder

www.elektronik-informationen.de/86019