

APPLICATION NOTE

ANQ001 | Frequenzprodukte - Grundlagen von Quarzen und Oszillatoren als Taktgeber



Susanna Engel Rodrigues

1. EINFÜHRUNG

Frequenzprodukte werden oft als Herzschlag elektronischer Schaltungen bezeichnet. In zahlreichen Anwendungen liefern sie das Taktsignal, das ICs (engl. Integrated Circuit / integrierter Schaltkreis) oder Mikrocontroller antreibt und so einen reibungslosen Betrieb ermöglicht. Ohne diese Taktgeber wären viele moderne Technologien und Systeme nicht realisierbar. Ein Großteil dieser frequenzbestimmenden Taktgeber basiert auf quarzgesteuerten Schaltungen – deshalb werden im Folgenden die Grundlagen dieser quarzbasierten Bauteile näher betrachtet.

Nach einer Übersicht über verschiedene frequenzbestimmende Produkte folgt eine Einführung in den piezoelektrischen Effekt – dem physikalischen Ursprung der Quarzschwingung. Anschließend wird der Quarz als Bauteil betrachtet, einschließlich seiner Herstellung und der wichtigsten Parameter. Ein Exkurs widmet sich dem Uhrenquarz und seinen Besonderheiten. Darauf aufbauend werden Quarzoszillatoren, ihre zentralen Kenngrößen sowie unterschiedliche Typen quarzbasierter Oszillatoren erläutert. Abschließend erfolgt ein Überblick über typische Anwendungen der Taktgeber, ohne dabei auf technische Details einzugehen.

2. FREQUENZPRODUKTE

Für die Erzeugung eines Taktsignals – als sogenannte Frequenzprodukte – kommen verschiedene Technologien zum Einsatz. Die Gängigsten davon werden im Folgenden kurz beschrieben. Der weiterführende Inhalt der Application Note konzentriert sich jedoch ausschließlich auf quarzbasierte Taktgeber.

2.1 Diskreter Schwingkreis

Unter einem diskreten Schwingkreis versteht man eine Schaltung, die aus grundlegenden passiven Bauelementen wie Kondensatoren (C), Induktivitäten (L) und ggf. Widerständen (R) aufgebaut ist. Beispielsweise ein LC-Schwingkreis kann dabei eine definierte Resonanzfrequenz aufweisen, jedoch nur eine gedämpfte Schwingung erzeugen. Für eine dauerhafte

Signalerzeugung ist stets eine aktive Rückkopplung erforderlich, wie sie in Oszillatorschaltungen vorkommt.

Die erreichbare Frequenzgenauigkeit solcher diskret aufgebauten Oszillatoren hängt stark von den Toleranzen der verwendeten Bauteile ab. Besonders RC-basierte Oszillatoren sind anfällig für Temperatur- und Alterungseinflüsse, was zu Frequenzabweichungen im Bereich von mehreren Tausend ppm (Parts per Million) führen kann. Auch parasitäre Effekte und externe Kopplungen können die Frequenzstabilität beeinträchtigen. In der Praxis liegt die Genauigkeit insbesondere von RC-Oszillatoren oft nur im Bereich von 1% – 5%. LC-Oszillatoren erreichen zwar bessere Werte, bleiben aber deutlich hinter quarzbasierten Lösungen zurück, was sie für viele Anwendungen ungeeignet macht.

2.2 Keramikresonatoren

Keramikresonatoren sind in ihrer Funktionsweise den Quarzen sehr ähnlich – auch sie nutzen den piezoelektrischen Effekt zur Erzeugung einer stabilen Frequenz. Jedoch werden hierfür ein anderes Material und ein anderer Herstellungsprozess verwendet. Häufig wird ein Keramikresonator mechanisch so aufgebaut, dass die für den Quarz notwendigen zwei in Serie liegende Kondensatoren im Bauteil mit integriert sind – somit werden keine externen zusätzlichen Kondensatoren benötigt. Deshalb haben Keramikresonatoren den Vorteil kompakter zu sein.

Des Weiteren sind Keramikresonatoren kostengünstig, ermöglichen meist Oszillatorschaltungen mit geringerem Stromverbrauch, weisen kürzere Anschlagzeiten im Vergleich zu einem Quarz auf und sind robust gegen Schock und Vibration. Dafür liegen die Frequenzstabilität und -toleranz beim Keramikresonator lediglich im Bereich von 0,2% (~ 2.000 ppm) bis 0,5% (~ 5.000 ppm).

2.3 MEMS

MEMS steht für Micro-Electro-Mechanical Systems – also mikroskopisch kleine Systeme, die sowohl mechanische als auch elektronische Komponenten enthalten. In der Frequenztechnik bezeichnet der Begriff meist winzige

Resonatoren aus Silizium, die mit ähnlichen Verfahren wie in der Halbleiterfertigung hergestellt werden. MEMS-Bauteile können je nach Anwendung mechanische Strukturen, Sensoren, Aktoren und integrierte Schaltungen in einem einzigen Chip vereinen. MEMS können viele verschiedene Funktionen und Anwendungen aufweisen, unter anderem auch die eines MEMS-Oszillators.

Durch die hohe Integration der elektronischen Schaltungen sind hier sehr kleine, kompakte Abmessungen möglich, die außerdem sehr robust gegen Schock und Vibration sind. Zudem kann hier die Resonatorfrequenz mittels einer Phasenregelschleife (Phase Locked Loop - PLL) innerhalb eines definierten Frequenzbereichs programmiert werden. Jedoch weisen MEMS-Oszillatoren eine starke Temperaturabhängigkeit der Frequenz auf – daher ist eine interne Temperaturkompensation unumgänglich. Die so erreichbare Frequenzstabilität der MEMS-Oszillatoren liegt im gleichen Bereich wie die von Quarzoszillatoren. Dieser Bereich erstreckt sich von ca. ± 20 ppm bei Standardbauteilen bis hin zu wenigen ppb (Parts per Billion) bei hochgenauen „ofengesteuerten“ MEMS-Oszillatoren.

2.4 Quarzbasierte Taktgeber

Quarz ist die kristalline Form von Siliziumdioxid (SiO_2) und bildet die Grundlage vieler frequenzbestimmender Bauteile. Der Grund dafür liegt in seinen besonderen physikalischen Eigenschaften, die sich zur Erzeugung stabiler Schwingungen eignen. Die Frequenz, mit der ein Quarz schwingt, hängt dabei maßgeblich von der Geometrie des Quarzrohlings – auch Blank genannt – ab. Ein großer Vorteil von Quarz liegt in seiner hohen Frequenzstabilität – bei entsprechender Verarbeitung bleibt die Frequenz auch über einen weiten Temperaturbereich hinweg äußerst konstant im Bereich von typischerweise ± 15 bis ± 30 ppm (-40°C bis 85°C). Dadurch sind nur geringe Frequenzabweichungen zu erwarten, selbst über viele Jahre hinweg. Allerdings benötigt ein Quarz zur Erzeugung eines nutzbaren Taktsignals stets eine zusätzliche, aktive Schaltung – erst in Kombination mit diesen elektronischen Komponenten entsteht ein funktionierender Oszillator.

3. PIEZOELEKTRISCHER EFFEKT

Der Funktion eines Schwingquarzes liegt der piezoelektrische Effekt zugrunde. Dieser Effekt wurde 1880 von den Gebrütern Jacques und Pierre Curie entdeckt. Hierbei stellten sie fest, dass bei bestimmten Kristallmaterialien durch das Einwirken einer mechanischen Kraft elektrische Ladung auf der Oberfläche entsteht.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, entsteht dieser Effekt durch die Verschiebung der Position von Ladungsträgern im Material durch mechanische Verformung.

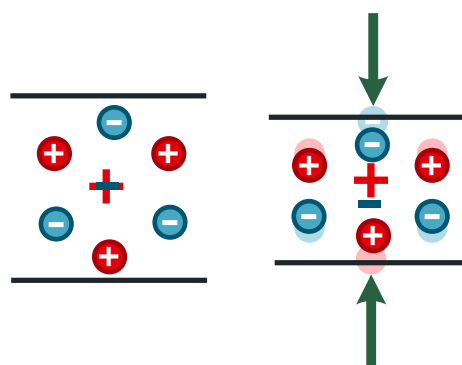


Abbildung 1: Prinzip des Piezoelektrischen Effekts im Quarzkristall.

So kommt es zur Bildung von Dipolen und somit zu einer elektrischen Spannung.

Zur Verwendung eines Quarzkristalles als frequenzgebendes Bauteil wird der umgekehrte, oder auch inverse, piezoelektrische Effekt genutzt. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung wird der Quarz verformt. Die Verformung liegt typischerweise im Bereich von etwa 1 bis 10 Pikometer pro Volt. Selbst bei 10 V beträgt die Verformung lediglich 10 bis 100 Pikometer, also deutlich weniger als der Durchmesser eines einzelnen Atoms (ca. 200 pm). Trotzdem reicht diese minimale Bewegung aus, um stabile Schwingungen im Quarz anzuregen. Ausgehend von dieser mechanischen Verformung entsteht eine elektrische Spannung. Durch den Aufbau in einer geeigneten elektronischen Schaltung beginnt der Quarz dauerhaft zu schwingen.

APPLICATION NOTE

ANQ001 | Frequenzprodukte - Grundlagen von Quarzen und Oszillatoren als Taktgeber

Dazu wird der Quarz in eine Rückkopplungsschaltung mit aktiven Verstärkerelementen eingebunden, die seine Eigenschwingung kontinuierlich aufrechterhält – typischerweise als sogenannter Quarzoszillator. Die Frequenz dieser Schwingung entspricht der Eigenresonanzfrequenz des Quarzes und wird hauptsächlich durch die Geometrie des Quarzes und der aufgebrauchten Elektrode bestimmt.

4. SCHWINGQUARZ

Nach der Entdeckung des piezoelektrischen Effektes 1880 ließ der Siegeszug des Quarzes als frequenzgebendes Bauteil noch auf sich warten – er wurde erst 1920 maßgeblich durch den Physiker Walter Guyton Cady eingeleitet. Dieser verwendete den Quarz in einem Oszillator und meldete nur ein Jahr später das erste Patent eines Quarzoszillators an.

Folgend werden die elektrotechnischen Grundlagen eines Quarzes erläutert, sowie ein Einblick in die Herstellung von Quarzen gegeben.

4.1 Schaltzeichen

Der Quarz wird in Schaltungen entsprechend Abbildung 2 dargestellt.

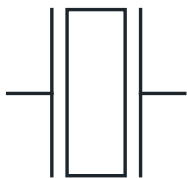


Abbildung 2: Schaltzeichen eines Schwingquarzes.

Für aktive Quarzoszillatoren gibt es kein genormtes Symbol – häufig wird daher das gleiche Symbol wie für einen passiven Quarz verwendet, ergänzt durch eine Beschriftung oder Typenangabe zur Unterscheidung.

4.2 Ersatzschaltbild

Das Ersatzschaltbild eines Quarzes (Abbildung 3) besteht einerseits aus einer Serienschaltung von R_1 , C_1 und L_1 und andererseits dem Kondensator C_0 .

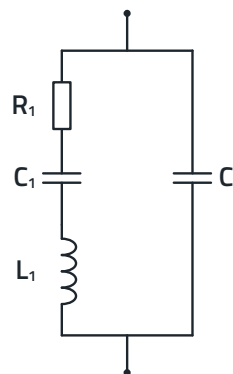


Abbildung 3: Ersatzschaltbild eines Schwingquarzes.

Dabei entspricht R_1 dem Resonanzwiderstand, also der Dämpfung der mechanischen Schwingung und L_1 der schwingenden Masse des Quarzes. C_1 stellt die dynamische Kapazität dar und entspricht damit dem piezoelektrischen Effekt. C_0 stellt die parasitäre Koppelkapazität des Quarzes da, die auch direkt messbar ist.

4.3 Herstellung

In den Anfangszeiten und über einige Jahrzehnte hinweg wurde natürlich gewachsenes Quarzrohmaterial für Oszillatorschaltungen verwendet. Ein bahnbrechender Entwicklungsschritt war in den 1960er Jahren die Möglichkeit, synthetisch gezüchtetes Quarzmaterial herzustellen. Dieser Schritt ebnete den Weg zu besserer Kontrolle und Genauigkeit, Wiederholbarkeit und vor allem, mehr Ertrag.

Die Herstellung von synthetischem Quarzmaterial findet in Autoklaven bei hoher Temperatur und hohem Druck statt. So entstehen nach durchschnittlich ein bis drei Monaten Quarzbarren, die im nächsten Schritt in einem speziellen Schnittwinkel zu Wafern weiterverarbeitet werden. Aus diesen Wafern werden wiederum die sogenannten Blanks oder auch Quarzrohlinge geschnitten.

Die Blanks unterscheiden sich in Form und Größe je nachdem welche Frequenz, welche Bauform und welcher Einsatzzweck daraus entstehen soll.

APPLICATION NOTE

ANQ001 | Frequenzprodukte - Grundlagen von Quarzen und Oszillatoren als Taktgeber

Nach den Wafer- und Blankschnitten wird im nächsten Schritt die Oberfläche der Quarzrohlinge bearbeitet. Ist die gewünschte Oberflächenqualität erreicht, werden auf beide Seiten des Blanks Elektroden aufgebracht. Diese Elektroden leiten später über die Halter den elektrischen Impuls in das Quarzmaterial weiter und umgekehrt, das elektrische Schwingensignal mit der gewünschten Frequenz des Quarzes auch wieder nach außen.

Zum Kontaktieren der Elektroden wird der Quarzblank an die Halter des Gehäuses angebracht. Dies geschieht mit Hilfe eines Spezialklebers, der eine gute mechanische, thermische und elektrische Verbindung herstellt, ohne die Schwingungseigenschaften des Rohlings zu beeinträchtigen. Sowohl die Elektroden als auch die Anbindung an die Gehäusehalterung sind in Abbildung 4 zu sehen.

Für eine finale Abstimmung der Frequenz wird der Quarz in diesem Zustand (ohne Gehäusedeckel) zum Schwingen gebracht und während einer Frequenzmessung letzte Anpassung der Elektrode durchgeführt. Danach wird der Quarz nur noch hermetisch verschlossen, beschriftet und einer Endkontrolle unterzogen.

4.4 Der Schnittwinkel

Durch den Schnittwinkel beim Schneiden des Blanks aus dem Quarzbarren werden wichtige Eigenschaften des Quarzes festgelegt. Je nachdem, unter welchem Winkel und in welcher Orientierung die Kristallstruktur geschnitten wird, ergeben sich unterschiedliche Schwingungsformen, Frequenzbereiche und Verhaltensweisen.

Die gängigsten Schnittwinkel sind in Abbildung 5 dargestellt.

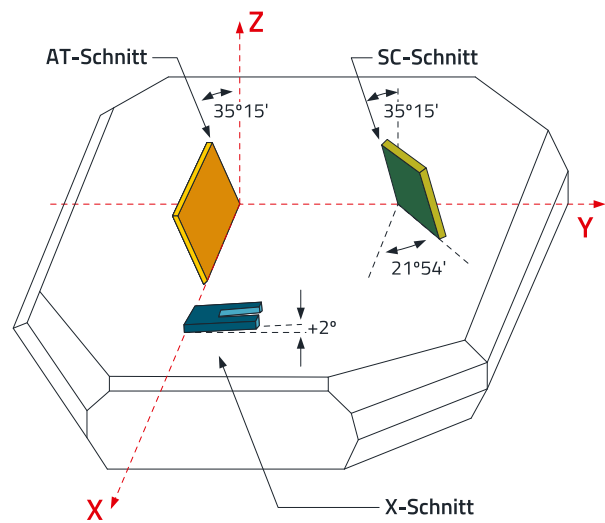


Abbildung 5: Verschiedene Schnittwinkel an einem Quarzbarren.

Der meistverwendete Schnittwinkel ist der AT-Schnitt, der idealerweise bei einem Winkel von $35^\circ 15'$ zur Z-Achse liegt – dieser ist in Abbildung 5 orange markiert. Dieser Schnitt wird für einen Großteil der Quarze im MHz-Frequenzbereich verwendet. Der AT-Schnitt eines Schwingquarzes weist bei etwa $35^\circ 15'$ einen minimalen Temperaturfrequenzgang auf, d.h. die Frequenz bleibt über einen weiten Temperaturbereich relativ stabil.

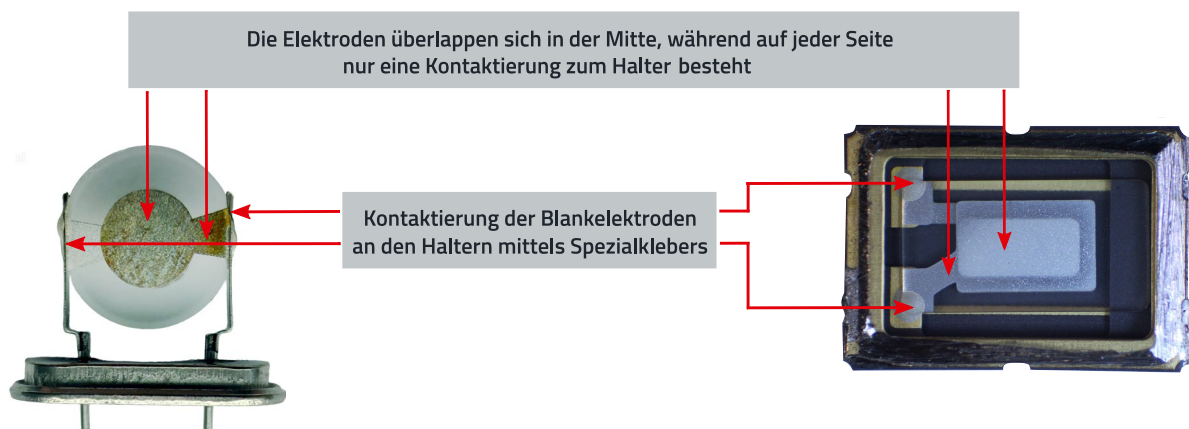


Abbildung 4: Elektrode und Aufbau eines **HC49** Quarzes und eines Quarzes im SMT-Gehäuse.

APPLICATION NOTE

Abbildung 6 veranschaulicht das Frequenzverhalten über dem Temperaturbereich.

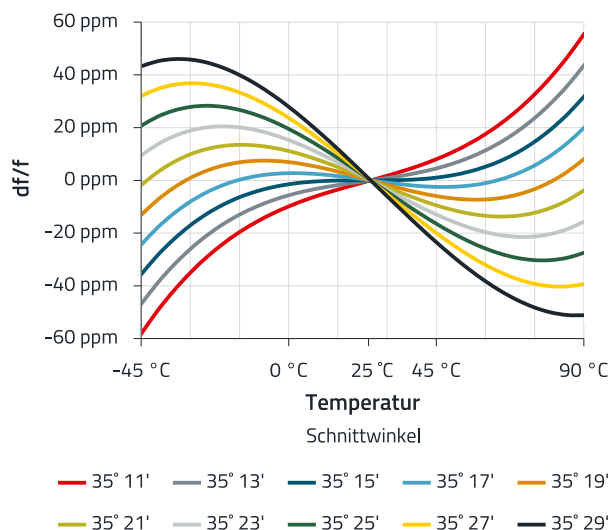


Abbildung 6: Temperaturgang der Frequenz des Schwingquarzes beim AT-Schnitt.

Hierbei entspricht jede der farbigen Linien einer Abweichung im Schnittwinkel in Winkelminuten. Aus dem Diagramm ist zu sehen, dass selbst geringe Abweichungen einen Einfluss auf das Temperaturverhalten des Quarzes haben. Weiterführende Informationen hierzu finden sich im Abschnitt 5.4 „Temperaturstabilität“ unter Kapitel 5.

Entsprechend des Schnittes durch die Kristallstruktur im Quarzbarren weist der Quarz auch eine bestimmte Schwingungsform auf. Bei dem AT-Schnitt Quarz handelt es sich um einen sogenannten Dickenschwinger. Entsprechend geht die Schwingung, wie in Abbildung 7 zu sehen, durch die Dicke des Blankes beziehungsweise entsteht zwischen den beiden Elektroden oben und unten.

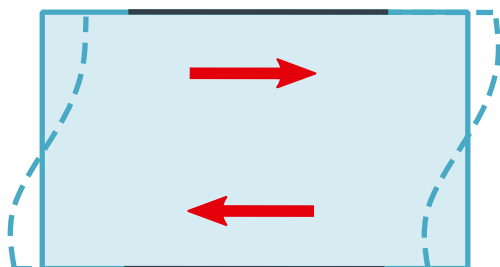


Abbildung 7: Dickenschwinger-Schwingung der Grundwelle im AT-Schnitt des Quarzes.

5. WICHTIGE PARAMETER DES SCHWINGQUARZES

Um einen Schwingquarz zu spezifizieren, gibt es einige wesentliche Parameter. Diese sind vor allem für die spezifische Schaltung in einer Anwendung wichtig. Die Schaltung muss entsprechend auf den Quarz ausgelegt und angepasst sein. Die wichtigsten Parameter werden nachfolgend beschrieben.

5.1 Frequenz

Der wohl wichtigste Parameter eines Quarzes ist seine Schwingfrequenz. Die Frequenz des Quarzes ist zum Beispiel der Takt für den Synthesizer des Mikrocontrollers und muss entsprechend des Controllerdatenblattes ausgewählt werden.

Die Frequenz des Quarzes wird je nach Größe in Kilohertz (kHz) oder Megahertz (MHz) angegeben.

Die Frequenz wird durch verschiedene Faktoren bestimmt:

- Der bereits erwähnte Schnittwinkel legt einen groben Frequenzbereich fest.
- Bei der weiteren Verarbeitung wird die Frequenz durch die Dicke und Geometrie des Blankes bestimmt.
- Durch das Auftragen der Elektroden auf den Quarz wird ebenfalls die Geometrie sowie die Masse und somit die Frequenz des Quarzes beeinflusst.

5.2 Grundton und Obertöne

Wie anfangs erwähnt (vgl. Abschnitt 3 „Piezoelektrischer Effekt“) wird ein Quarz in den meisten Anwendungsfällen auf seiner Resonanzfrequenz angeregt. Hier wird auch vom Grundton oder, aus dem englischen, dem Fundamental Mode gesprochen. In diesem Grundton führt der Quarz seine mechanische Schwingung wie in Abbildung 7 dargestellt aus. Mit diesem Grundton ist die Höhe der Frequenz allerdings physikalisch begrenzt, da mit steigender Frequenz der Blank immer dünner wird.

Um höhere Frequenzen zu verwirklichen, besteht die Möglichkeit, den Quarz auf einem seiner Obertöne (engl. Overtone) anzuregen. Diese sind jeweils ein ungerades Vielfaches und liefern ein entsprechendes Vielfaches der Frequenz.

APPLICATION NOTE

ANQ001 | Frequenzprodukte - Grundlagen von Quarzen und Oszillatoren als Taktgeber

In Abbildung 8 ist beispielhaft die Dickenscherschwingung im 3. Oberton skizziert.

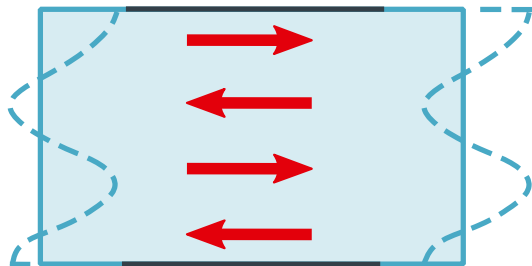


Abbildung 8: Dickenscherschwingung im 3. Oberton im AT-Schnitt des Quarzes.

Für den Betrieb auf einer Obertonfrequenz muss sowohl der Quarz entsprechend ausgelegt sein als auch die Oszillatorschaltung darauf abgestimmt werden, da die Grundtonresonanz gezielt unterdrückt werden muss. In vielen Standard-Digitalanwendungen wird dieses Verfahren heute jedoch nur noch selten angewandt – stattdessen greift man meist direkt auf integrierte Oszillatoren zurück.

5.3 Toleranz

Bei der Toleranz eines Quarzes wird von seiner Frequenzgenauigkeit bei Raumtemperatur (25°C) ausgegangen. Die Toleranz wird durch die Herstellgenauigkeit festgelegt und als Frequenzabweichung in ppm oder ppb angegeben.

5.4 Temperaturstabilität

Die Temperaturstabilität – oftmals auch lediglich als „Stabilität“ bezeichnet – eines Quarzes gibt Aufschluss über seine Frequenzabweichung innerhalb eines spezifizierten Arbeitstemperaturbereichs. Die Temperaturstabilität wird wesentlich durch den Schnittwinkel beeinflusst, wie Abbildung 9 verdeutlicht.

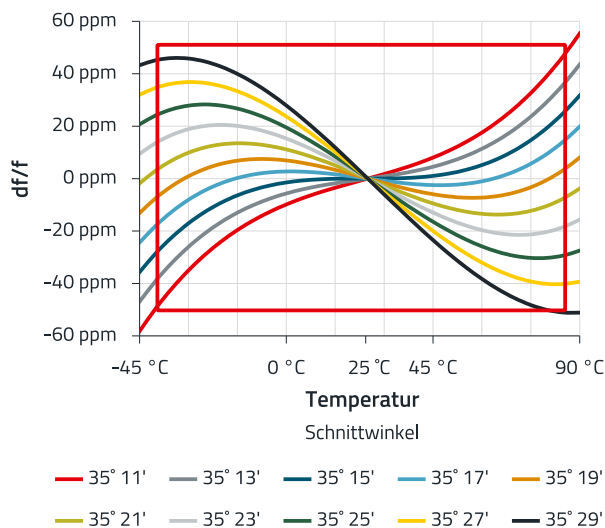


Abbildung 9: Stabilität der Quarzfrequenz über der Temperatur.

Das rote Rechteck veranschaulicht hierbei den häufig verwendeten Temperaturbereich von -40°C bis +85°C. Je größer der Arbeitstemperaturbereich ist, desto größer wird die Frequenzabweichung. Auch die Temperaturstabilität wird in ppm oder ppb angegeben.

5.5 Lastkapazität

Die Lastkapazität ist beim Quarz einer der wichtigsten Spezifikationsmerkmale und wird dennoch häufig unterschätzt oder falsch umgesetzt. Die Lastkapazität in Pikofarad pF gibt an, mit welcher Last der Quarz während der Fertigung abgestimmt wurde – und nur bei dieser Last kann die Einhaltung der Spezifikation garantiert werden. Wenn beim Erstellen der Oszillatorschaltung die Last falsch ausgelegt wird, kann das zu einer Veränderung der Frequenz des Quarzes führen. Die Lastkapazität in der Oszillatorschaltung wird durch die zwei notwendigen Kondensatoren (siehe Abbildung 13: Schaltplan einer Pierce-Oszillator Schaltung), sowie der Streukapazität der Leiterbahnen und der Anschlüsse der aktiven Schaltung (z. B. Mikrocontroller) bestimmt.

APPLICATION NOTE

5.6 Equivalent Series Resistance (ESR)

Der äquivalente Serienwiderstand, meist entsprechend dem Englischen als ESR (Equivalent Series Resistance) bezeichnet, entspricht dem R_1 im Ersatzschaltbild und stellt die Dämpfung der mechanischen Schwingung dar. Dieser Widerstand resultiert aus den Blank-Abmessungen, aber auch zum Beispiel aus den Widerstandswerten der Blank-Halterung. Der ESR stellt Verluste des Quarzes dar - bei der Dimensionierung der Oszillatorschaltung muss sichergestellt werden, dass der ESR in Form von Verstärkung durch die elektronische Schaltung kompensiert wird, um ein Anschwingen des Quarzes sicherzustellen.

5.7 Drive Level

Der Drive Level eines Quarzes beschreibt die Leistung, die im eingeschwingenen Zustand im Quarz umgesetzt wird. Der Drive Level ist eine wichtige Kenngröße bei der Auslegung der Oszillatorschaltung. Übersteigt die angelegte Leistung die maximal zulässige Leistung des Quarzes, kann es zu Veränderungen der Quarzeigenschaften bis hin zur Zerstörung des Quarzes kommen. Ist die angelegte Leistung allerdings zu gering, kann das dazu führen, dass der Quarz nicht zuverlässig anschwingt oder in seiner Funktionalität eingeschränkt ist.

Der Drive Level wird in Watt (W) bzw. meist in Milliwatt (mW) oder Mikrowatt (μ W) angegeben und maßgeblich durch die Geometrie des Blankes bestimmt. Da die Wahrscheinlichkeit und die Risiken eines zu hohen Drive Levels weit größer sind, wird im Datenblatt eines Quarzes für gewöhnlich lediglich der maximal zulässige Drive Level angegeben.

6. UHRENQUARZ

Eine spezielle Art des Quarzes ist der **Uhrenquarz**, englisch Watch Crystal, dessen Name bereits das Hauptanwendungsgebiet beschreibt - nämlich in einer Uhr bzw. als Zeittaktgeber. Der Uhrenquarz unterscheidet sich dabei in einigen wesentlichen Merkmalen von den vorher beschriebenen Quarzen, welche nachfolgend genauer erklärt werden sollen.

6.1 Frequenz

Die meisten als Uhrenquarz bezeichneten Quarze haben die feste Frequenz von 32,768 kHz. Diese Frequenz ergibt 15-mal geteilt durch zwei genau 1 Hertz (Hz), also eine Schwingung pro Sekunde und ist somit ideal geeignet, um zum Beispiel den Schrittmotor einer Uhr zu betätigen. Dabei

ist die Frequenz 32,768 kHz noch einfach, günstig und in kleiner Baugröße herstellbar und hat sich somit als Uhrenfrequenz durchgesetzt.

6.2 Blankform

Eine weitere gängige Bezeichnung für den Uhrenquarz ist „Stimmgabel-Quarz“, welche sich direkt auf seine Blankform bezieht. Um die niedrige Frequenz eines Uhrenquarzes in einer kleinen Bauform realisieren zu können, werden hier eine andere Blankform, ein anderer Schnittwinkel und auch eine andere Schwingungsform verwendet. Würde eine so niedrige Frequenz in einem klassischen AT-Schnitt in runder oder rechteckiger Form verwirklicht werden, wäre der Blank bereits sehr dick und somit völlig ungeeignet. Deshalb wird für den Uhrenquarz der Blank in Form einer Stimmgabel geschnitten, wie in Abbildung 10 dargestellt.

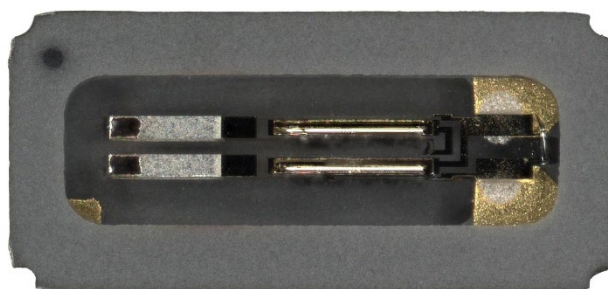


Abbildung 10: Stimmgabelform eines Uhrenquarzes.

Um trotzdem gute Eigenschaften zu gewährleisten, wird der Blank zudem nicht in dem vorher erwähnten AT-Schnitt aus dem Quarzbarren geschnitten, sondern im X- (vgl. Abbildung 5 in blau) oder XY-Schnitt (nicht dargestellt).

Mit dieser Änderung im Schnitt geht eine Änderung in der Schwingungsform des Quarzes einher: der Uhrenquarz führt eine spezielle Form der Biegeschwingung aus, wie in Abbildung 11 gezeigt.



Abbildung 11: Schemata der Biegeschwingung eines Uhrenquarzes.

Eine weitere Folge des geänderten Schnittwinkels ist das geänderte Temperaturverhalten der Frequenz. Anders als bei den AT-Schnitt Quarzen (vgl. Abbildung 6) entspricht der Frequenzverlauf einer nach unten geöffneten Parabel (Abbildung 12).

APPLICATION NOTE

ANQ001 | Frequenzprodukte - Grundlagen von Quarzen und Oszillatoren als Taktgeber

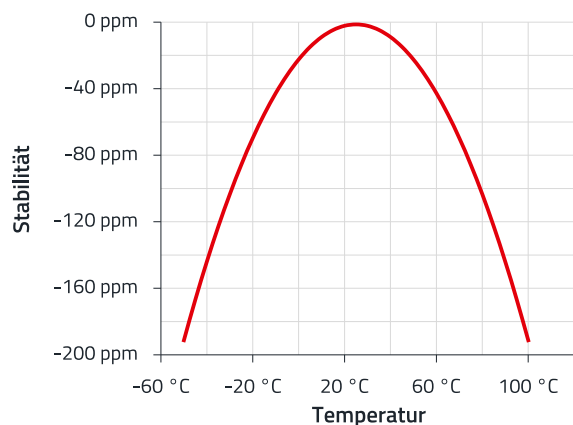


Abbildung 12: Stabilität der Quarzfrequenz des Uhrenquarzes über der Temperatur.

Die Frequenzgenauigkeit ist im Temperaturbereich um 25 °C sehr hoch, lässt allerdings bei steigender oder fallender Temperatur stark nach. Zudem lässt sich die Temperaturstabilität des Uhrenquarzes auch nicht durch andere Produktionsschritte verbessern – wird eine bessere Temperaturstabilität benötigt, muss dies durch den Oszillator selbst erreicht werden. Deshalb wird in den meisten Fällen im Datenblatt eines Uhrenquarzes statt einer direkten Angabe der Temperaturstabilität lediglich der entsprechende Koeffizient angegeben, mit dem der Stabilitätswert für den jeweiligen Temperaturbereich berechnet werden kann.

Aufgrund der unterschiedlichen Geometrie des Uhrenquarzes unterscheidet dieser sich von den AT-Quarzen zusätzlich auch stark durch seinen wesentlich niedrigeren Drive Level und in seinem wesentlich höheren ESR.

7. OSZILLATORSCHALTUNG

Der Schwingquarz ist ein passives Bauteil. Um ihn als Taktgeber verwenden zu können, wird eine Oszillatorschaltung benötigt, die aktive elektronische Bauelemente wie Transistoren oder Operationsverstärker enthält.

Im Bereich der digitalen Anwendung als Takt-Oszillator wird dies in den meisten Fällen mit einer Pierce-Oszillator-Schaltung nach Abbildung 13 verwirklicht.

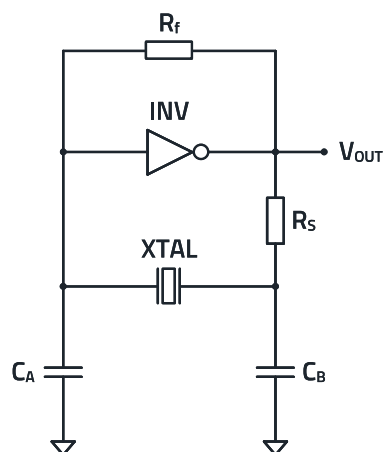


Abbildung 13: Schaltplan einer Pierce-Oszillator-Schaltung.

Der Oszillator besteht meist aus einem invertierenden Verstärker (z. B. einem Inverter oder Transistor) und einem Quarz, der in einer Rückkopplungsschleife liegt. Der Quarz bestimmt die Oszillatorfrequenz durch seine Resonanzeigenschaften. Die beiden Kondensatoren im Pierce-Oszillator sorgen zusammen mit dem Quarz für die nötige Phasenverschiebung und Rückkopplung zur Aufrechterhaltung der Oszillation. Außerdem bestimmen sie die effektive Lastkapazität, die die exakte Oszillatorfrequenz beeinflusst.

Für die Funktion, der Erzeugung einer sich selbst erhaltenden Schwingung (Oszillation), gibt es zwei Bedingungen (Barkhausen Kriterien):

- Das Produkt der Verstärkung innerhalb der Schleife muss bei der gewünschten Schwingungsfrequenz gleich oder größer als eins sein.
- Die Phasenverschiebung in der Schleife muss Null oder ein ganzzahliges Vielfaches von 2π (360°) sein.

Wenn der Inverter in Abbildung 13 nun eine Phasenverschiebung von -180° hat, sind zusätzliche -180° durch die übrigen externen Komponenten erforderlich, um das Kriterium der Phasenverschiebung zu erfüllen.

Die Werte der externen Komponenten müssen so gewählt werden, dass sowohl die zuvor erwähnte Amplituden- als auch die Phasenkomponente der Resonanzbedingung erfüllt wird, ohne die maximale Quarzlast zu überschreiten. In der Regel kann ein guter Kompromiss gefunden werden.

Die Wahl desselben Wertes für C_A und C_B ist eine gängige Praxis und liefert in den meisten Fällen gute Ergebnisse. Um möglichst genau den Sollwert der Lastkapazität zu erreichen, können durchaus unterschiedliche Kapazitätswerte verwendet werden. Dabei sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die beiden Werte nicht zu stark voneinander abweichen. Zudem ist es wichtig, den Kondensator mit der größeren Kapazität an die Stelle von C_B zu setzen.

Der typische Wertebereich für die Kondensatoren C_A und C_B liegt bei 3,3 bis 47 pF.

Der verwendete Wert von R_f ist frequenzabhängig. Je niedriger die Oszillatorfrequenz ist, desto höher ist der erforderliche Wert. Dabei sollte der Widerstand so dimensioniert sein, dass er knapp oberhalb des Werts liegt, ab dem er die Oszillatorfrequenz merklich beeinflusst. In Tabelle 1 sind typische Werte für R_f aufgeführt.

Frequenz	R_f [M Ω]
32,768 kHz	10 – 15 M Ω
1 MHz	5 – 10 M Ω
10 MHz	1 – 5 M Ω
20 MHz	470 k Ω – 5 M Ω
50 MHz	150 k Ω – 3 M Ω

Tabelle 1: Typische Werte für den Rückkopplungswiderstand R_f .

Heutzutage sind der Widerstand R_f sowie der Inverter fast ausschließlich bereits im Mikrocontroller / IC integriert und müssen somit bei der Auslegung der Oszillatorschaltung nicht mehr berücksichtigt werden.

Der Serienwiderstand R_s , der am Ausgang des Inverters liegt, entkoppelt den Ausgangstreiber von der komplexen Last, die von C_B , C_A und dem Quarz gebildet wird. Besonders bei Stimmgabelquarzen (Uhrenquarzen) ist R_s zwingend erforderlich, da diese nur mit sehr geringer Leistung (typisch $< 1 \mu\text{W}$) betrieben werden dürfen. Ein zu niedriger Widerstand kann den Quarz dauerhaft beschädigen. Typische Werte für R_s liegen hier bei über 10 k Ω . Zusätzlich bildet R_s mit C_B ein Verzögerungsnetzwerk, das eine zusätzliche Phasenverschiebung erzeugt, die vor allem bei niedrigen Frequenzen unter 10 MHz für einen stabilen Oszillationsbetrieb erforderlich ist. Diese zusätzliche Phasenverschiebung reduziert den Jitter im Zeitbereich bzw.

das Phasenrauschen im Frequenzbereich. Im Frequenzbereich über 16 MHz kann wegen der schon ausreichenden Phasenverschiebung durch den Inverter und C_B häufig auf R_s verzichtet werden. Bei Standardquarzen (MHz) liegt der typische Wert von R_s im Bereich von 10 – 1000 Ω .

8. OSZILLATOR

Anstatt eines Quarzes und einer eigens aufgebauten „Aktivierungsschaltung“ besteht auch die Möglichkeit, einen betriebsbereiten, integrierten Oszillator zu verwenden.

Im Folgenden werden die Unterschiede zwischen einem Quarz und einem integrierten Oszillator erläutert, sowie Auswahlkriterien für diese Oszillatoren vorgestellt. Außerdem wird ein kurzer Überblick über die gängigsten Oszillatortypen und eine Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen gegeben.

8.1 Unterschied zwischen Quarz und Quarzoszillator

Ein Quarz ist eine passive Komponente und kann allein keine Schwingungen erzeugen. Wie im Abschnitt 7 „Oszillatorschaltung“ bereits erläutert, benötigt er eine zusätzliche Verstärker- oder Anregungsschaltung, um in Schwingung versetzt zu werden. Alternativ sind Oszillatoren auch als fertige Bausteine erhältlich, bei denen der Quarz und die notwendige Elektronik bereits in einem gemeinsamen Gehäuse integriert sind. Bei einem Oszillator wird somit von einem aktiven Bauteil gesprochen. Abbildung 14 veranschaulicht nochmal den Unterschied zwischen Quarz, Oszillatorschaltung und integriertem Oszillator.

Ob die Wahl nun auf einen Quarz oder einen integrierten Oszillator fällt, ist von einigen Gesichtspunkten abhängig:

- **Entwicklungsaufwand und Knowhow:** um eine Oszillatorschaltung sicher und richtig auszulegen, bedarf es sowohl Zeit als auch Wissen. Die Verwendung eines integrierten Oszillators hingegen ist meist einfach und schnell zu bewerkstelligen.
- **Preis:** der Quarz als passives Bauteil ist für gewöhnlich wesentlich günstiger als der Oszillator. Allerdings gilt es zu bedenken, dass weitere Bauteile notwendig sind, um den Quarz zum Schwingen zu bringen – diese sollten bei einer Preisberechnung ebenfalls mit einkalkuliert werden.
- **Platz:** durch die integrierte Lösung bei einem Oszillator lässt sich Platz auf der Leiterplatte sparen.

APPLICATION NOTE

ANQ001 | Frequenzprodukte - Grundlagen von Quarzen und Oszillatoren als Taktgeber

- Frequenz:
 - Niedrige Frequenzen können bei einem integrierten Oszillator einfach in kleinen Bauformen realisiert werden, während es hier bei Quarzen eine physikalische Grenze gibt. Bei Quarzen gilt, je niedriger die Frequenz, desto dicker wird der Blank – eine niedrige Frequenz in kleiner Bauform mittels Teiler aufzubauen ist jedoch in den meisten Fällen ein ungleich höherer Aufwand, als einen fertigen Oszillator zu verwenden.
 - Hohe Frequenzen sind ebenfalls einfacher mit einem Oszillator zu realisieren, da bei Quarzen die Verwendung im Oberton notwendig wäre, welche erneut ein aufwendigeres Schaltungsdesign mit sich führt.
- Stabilität: wird eine höhere Frequenzstabilität benötigt, als sie mit einem Quarz und einer einfachen Aktivierungsschaltung zu realisieren ist, bedarf es weiterer Bauteile und Schaltungselemente – hier bietet sich die Verwendung eines umfangreicheren, integrierten Oszillators, zum Beispiel eines TCXOs (engl. Temperature Compensated Xtal Oscillator), an.

8.2 Oszillatorenarten

Um die Frequenzstabilität der Grundschiung, wie z. B. der Pierce-Schaltung nach Abbildung 13, zu verbessern, können bei den meisten Oszillator-Topologien schaltungstechnische Erweiterungen durchgeführt werden. Diese sind nachfolgend kurz erklärt. Eine Übersicht über die Arten und ihrer wichtigsten Kenngrößen fasst zudem Tabelle 2 zusammen.

SPXO	Stabilität und Phasenrauschen werden zunehmend besser	↓	Stromverbrauch, Preis, Baugröße und Anzahl der Komponenten werden zunehmend größer
VCXO			
TCXO			
OCXO			
Disziplinierter OCXO			
Rubidium-Oszillator			

Tabelle 2: Übersicht der verschiedenen Oszillatorarten und der wichtigsten Kenngrößen.

XO/SPXO

Der oft als XO oder **SPXO** (Simple Packaged Xtal Oscillator) bezeichnete, einfache Oszillator entspricht dem Aufbau der grundlegenden Quarzaktivierungsschaltung (z. B. Pierce-Oszillator). Die Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Frequenzstabilität entspricht der eines Quarzes und liegt entsprechend im Bereich von ± 15 ppm bis ± 50 ppm über einen Temperaturbereich von -40°C bis 85°C . SPXOs sind trotzdem für viele Anwendungen ausreichend und auf Grund der Einfachheit eine gute und kostengünstige Lösung.

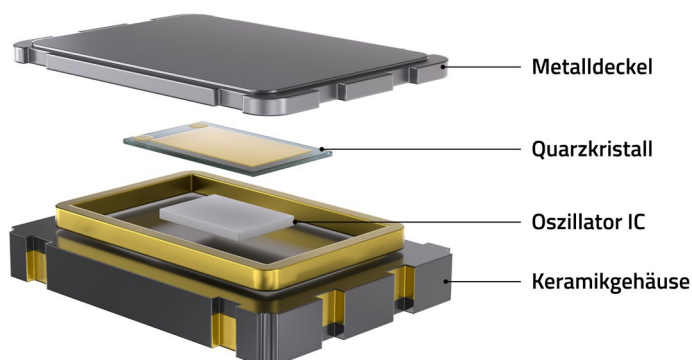
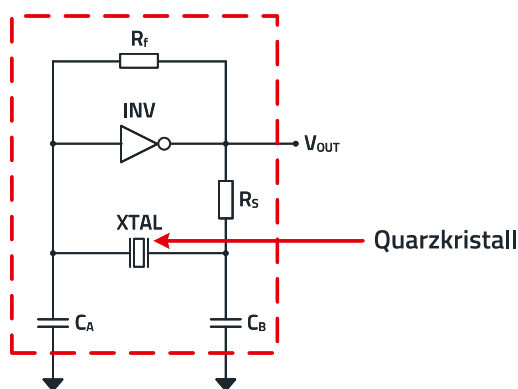


Abbildung 14: Unterschied zwischen analog aufgebauter Oszillatorschaltung (links) und integriertem Oszillator (rechts).

APPLICATION NOTE

ANQ001 | Frequenzprodukte - Grundlagen von Quarzen und Oszillatoren als Taktgeber

VCXO

Bei einem spannungsgesteuerten Oszillator (engl. Voltage Controlled Xtal Oscillator) besteht für den Anwender die Möglichkeit mittels einer zusätzlichen Spannung, der sogenannten Ziehspannung, die Frequenz des Oszillators bis zu einem bestimmten Grad zu verändern. Dadurch können zum Beispiel die Einflüsse von Temperatur, Alterung, Versorgungsspannungs- und Laständerungen über eine elektronische Schaltung ausgeglichen werden. Der VCXO findet häufig Anwendung in einer Phase-Locked-Loop (PLL) Schaltung, bei der das Ausgangssignal mit einem Referenzsignal verglichen und mit Hilfe der Ziehspannung angepasst wird.

Die Stabilität des VCXOs ohne zusätzliche Regelung ist vergleichbar mit der des Quarzes oder SPXOs.

TCXO

Beim temperaturkompensierten Oszillator (engl. Temperature Compensated Xtal Oscillator) wird der Umstand genutzt, dass das Frequenzverhalten über Temperatur des Quarzes bekannt und vorhersehbar ist. Während der Fertigung eines digitalen TCXOs wird hierfür dessen Frequenzverhalten erfasst und gespeichert. Mit Hilfe eines integrierten Temperatursensors kann im Betrieb die Temperatur gemessen und anhand der gespeicherten Aufzeichnungen die entsprechende Frequenzabweichung ermittelt und kompensiert werden. Somit lässt sich eine wesentlich höhere Frequenzstabilität von $\pm 2,5$ ppm und besser erreichen.

OCXO

Ein ofengesteuerter Oszillator (engl. Oven Controlled Xtal Oscillator) enthält eine Heizung, die den Quarz und Teile der umliegenden Peripherie konstant auf einer Temperatur hält. Meist liegt die Temperatur bei ca. 80°C , da dies sowohl für den AT-Schnitt als auch für den hier häufig verwendeten SC-Schnitt einem günstigen Punkt entspricht. In Abbildung 15 sind die Kurven der Frequenzabweichung über der Temperatur der jeweiligen Schnitte mit einem Fokus auf 80°C dargestellt. Wie zu erkennen ist, ist die Kurve des SC-Schnitts bei diesem Temperaturpunkt wesentlich flacher – entsprechend haben kleine Temperaturschwankungen beim SC-Schnitt auch einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Stabilität.

Durch den dauerhaft temperierten Quarz können äußere Temperatureinflüsse fast vollständig ausgeschlossen werden und somit eine sehr hohe Stabilität im Bereich von 10 ppb und besser realisiert werden. Durch das dauerhafte Heizen ist allerdings auch der Stromverbrauch eines OCXOs weit höher als bei weniger genauen Oszillatorarten.

Disziplinierte OCXOs

Disziplinierte OCXOs bieten die Möglichkeit einer zusätzlichen Synchronisation mittels eines Signals einer hochpräzisen Quelle, wie z. B. vom globalen Navigationssatellitensystem (GNSS). Dadurch wird die Stabilität, vor allem auch über einen langen Zeitraum, weiter verbessert. Zudem bieten viele disziplinierte OCXOs ein hervorragendes Holdover – das bedeutet beim Ausfall des Referenzsignals liefern sie über viele Stunden weiterhin ein sehr genaues Signal.

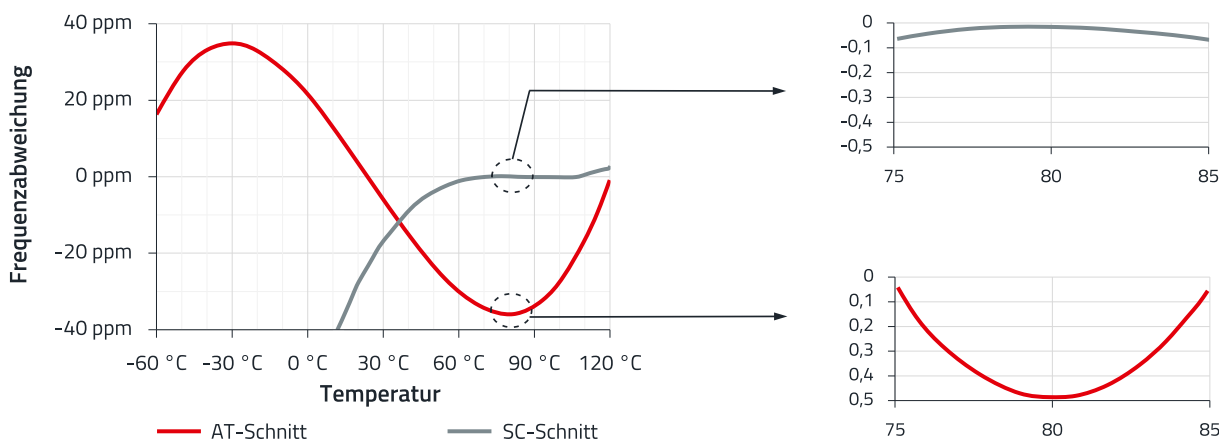


Abbildung 15: Unterschied der Frequenz über Temperatur Verhaltenskurven von AT- und SC-Schnitt.

Rubidium-Oszillatoren

Rubidium-Oszillatoren zählen zu den Atomuhren und sorgen für absolute Genauigkeit sowohl kurz- als auch langfristig. Bei einem Rubidium-Oszillator wird die Referenzfrequenz durch den Energiezustandswechsel der Rubidiumatome erfasst und mit der Frequenz eines OCXOs mittels Regelschleife (PLL) verglichen. Dies sorgt für eine sehr genaue Frequenz, die beispielsweise als Zeit- und Frequenznormal genutzt wird.

9. WICHTIGE PARAMETER VON OSZILLATOREN

Ein Oszillator verbindet und beinhaltet viele der Parameter, die bereits im Kapitel 5 hinsichtlich Quarze erklärt werden, allerdings gibt es auch Unterschiede, auf die hier näher eingegangen werden soll.

9.1 Frequenz

Bei der Frequenz unterscheidet sich der Oszillator nicht von einem Quarz – es ist und bleibt das wichtigste Merkmal.

9.2 Stabilität

Während beim Quarz die Temperaturstabilität und Toleranz gesondert betrachtet werden, wird bei einem Oszillator weitestgehend lediglich ein Wert – die Stabilität – angegeben. Dieser Wert beinhaltet neben der Temperaturstabilität und Toleranz häufig auch die Frequenzabweichung des Oszillators bei Versorgungsspannungsschwankungen und Lastschwankungen. Auch hier wird die Stabilität in ppm oder ppb angegeben.

9.3 Versorgungsspannung

Da es sich bei einem Oszillator um ein aktives Bauteil handelt, muss eine Versorgungsspannung angelegt werden, um den Oszillator in Betrieb nehmen zu können. Integrierte Oszillatoren für Leiterplattenanwendungen sind in allen gängigen Versorgungsspannungen, wie zum Beispiel 5 V, 3,3 V oder 1,8 V erhältlich. Zudem gibt es auch vermehrt Oszillatoren, die über einen variablen Versorgungsspannungsbereich betrieben werden können.

9.4 Ausgangssignal

Das Ausgangssignal eines Quarzes ist immer ein Sinussignal mit seiner Resonanzfrequenz. Bei einem Oszillator kann das Ausgangssignal je nach Applikation z. B. auch eine Rechteckspannung sein. Oszillatoren mit sinusförmiger Ausgangsspannung werden in Applikationen eingesetzt, bei denen eine sehr geringe Signalverzerrung gefordert wird: der

Anteil der harmonischen Oberwellen und der Phasenjitter müssen also möglichst gering sein. Typische Anwendungen sind Signalmischer, Prüf- und Signalgeneratoren und Sendeeinheiten.

Die häufigere Anwendung von Oszillatoren ist im Bereich der digitalen Elektronik und damit die Applikation mit rechteckiger Ausgangsspannung. Der dabei typisch integrierte Chip ist der CMOS-Oszillator (CMOS: Complementary Metal–Oxide–Semiconductor), der ein rechteckiges Ausgangssignal zur Verfügung stellt. Damit kann der Oszillator direkt mit dem Mikrocontroller oder IC verbunden werden. Der Frequenzbereich dieser Oszillatoren erstreckt sich bis typ. 200 MHz.

Eine weitere Option für einen Oszillatorausgangssignal ist der Clipped Sinewave. Dieser liefert ein analoge, sinusähnliche Ausgangswellenform, deren Spitzen durch eine interne Begrenzerschaltung leicht beschnitten sind. Dieses Signal ist deutlich oberwellenärmer und stromsparender als ein digitales Rechtecksignal, weshalb es sich gut für HF-Anwendungen und TCXOs eignet. Wenn ein Clipped-Sinewave-Signal später in digitalen Schaltungen verwendet werden soll, z. B. als Takteingang einer MCU oder eines Logikbausteins, wird es häufig über einen Schmitt-Trigger geführt. Dieser wandelt das analoge Clipped-Sinewave-Signal in ein sauberes digitales Rechtecksignal um, indem er definierte obere und untere Schaltschwellen verwendet. Dadurch entsteht eine Hysterese, die Rauschen unterdrückt und ein stabiles Digitalsignal erzeugt.

Für Schaltungen mit symmetrischen Taktsignalen, meist verbunden mit hohen Taktfrequenzen, werden Oszillatoren mit differenziellem Ausgangssignal verwendet. Differenzielle Signale kompensieren zudem elektromagnetische Störungen, da die Störungen auf beiden Leitungen gleichermaßen wirken und sich in der Differenz aufheben. Durch ihren geringen Jitter und minimale Verzerrungen verbessert sich die Signalqualität und damit die Signalintegrität, was sie besonders für Anwendungen in Hochgeschwindigkeitsapplikationen auszeichnet. Differenzielle Signale ermöglichen aufgrund ihrer Eigenschaften geringere Verluste und Phasenverschiebungen, was sie robuster für längere Übertragungsstrecken macht. Differenzielle Signale sind außerdem weniger anfällig für Schwankungen in der Stromversorgung oder in der Masse (GND), da sie die Differenzspannungen zwischen den Leitungen nutzen, nicht die absoluten, massebezogenen Spannungen. Die

meistverwendeten Signale hier sind (LV) PECL (Low Voltage Positive Emitter Coupled Logic) und LVDS (Low Voltage Differential Signaling).

9.5 Phasenrauschen / Jitter

Phasenrauschen und Jitter sind spezielle Signalmerkmale. Bei Oszillatoren wird damit die Kurzzeitstabilität beschrieben.

Phasenrauschen beschreibt zufällige Schwankungen in der Phase eines Signals über die Zeit. Diese Schwankungen führen dazu, dass das Spektrum eines idealen, schmalbandigen Signals breiter wird und seitliche Bänder (Sidebands) um die zentrale Frequenz herum erzeugt werden. Es wird im Frequenzbereich analysiert und gemessen. Phasenrauschen ist die spektrale Dichte des Phasenfehlers, gemessen in dBc/Hz (Dezibel bezogen auf den Träger pro Hertz) bei einem bestimmten Abstand von der Trägerfrequenz. Das Phasenrauschen wird durch Vergleich des Spektrums eines realen Oszillators mit einem idealen, rauschfreien Oszillator gemessen.

Jitter bezieht sich auf zeitliche Schwankungen eines Signals, insbesondere in Bezug auf die zeitliche Position der Signalfanken. Es ist damit ein Maß für die Instabilität im Zeitbereich. Jitter ist die zeitliche Abweichung vom idealen Übergangszeitpunkt eines Signals, gemessen in Sekunden oder als Verhältnis (z. B. ppm). In

Hochgeschwindigkeits-Datenkommunikationssystemen kann Jitter die Integrität des Datensignals beeinträchtigen, was zu Übertragungsfehlern und Synchronisationsproblemen führt.

Phasenrauschen und Jitter hängen von verschiedenen Faktoren ab, zum Beispiel vom verwendeten Quarz, von der Oszillatorschaltung, von der verwendeten Leistung, aber auch von der Umgebung und deren Einflüsse wie Temperatur, Schock und Vibration.

10. ANWENDUNGEN

Quarze und Oszillatoren werden in einer Vielzahl von Anwendungen benötigt. Im Folgenden werden einige Anwendungsgebiete genauer erläutert.

10.1 Zeitgeber

Uhrenquarze werden seit Jahrzehnten als Taktgeber für Uhren und Zeiterfassungssysteme verwendet. Dank ihrer präzisen Frequenz im Temperaturbereich um 25°C, ihrem günstigen Preis und ihrer Einfachheit sind sie auch heute noch die erste Wahl in elektronische Schaltung zur Zeitmessung.

10.2 Mikrocontroller / Prozessoren

Wie eingangs bereits erwähnt, dienen Frequenzprodukte häufig als Taktgeber für Mikrocontroller. Hierfür sind sie dank ihrer Genauigkeit, Robustheit und ihres meist günstigen Preises ideal geeignet.

Als Taktquelle bestimmt der Quarz oder Oszillator mit seiner Frequenz den zeitlichen Ablauf aller Vorgänge im Mikrocontroller. Er sorgt dafür, dass Prozesse synchron ablaufen, die erforderliche Verarbeitungsgeschwindigkeit erreicht wird und vor allem eine hohe zeitliche Genauigkeit gewährleistet ist. Viele Mikrocontroller verfügen zwar über einen internen Taktgenerator, dieser bietet jedoch häufig nicht die Präzision externer Quarz- oder Oszillatorschaltungen.

10.3 Kommunikation

Quarze und Oszillatoren werden verwendet, um sicher zu stellen, dass elektronische Systeme miteinander kommunizieren können. Um dies zu gewährleisten, müssen alle beteiligten Komponenten auf der gleichen Frequenz „sprechen“. Um weltweit eine einheitliche Kommunikation zu gewährleisten, verwenden bestimmte Schnittstellen und Technologien standardisierte Frequenzen, die international abgestimmt sind.

APPLICATION NOTE

ANQ001 | Frequenzprodukte - Grundlagen von Quarzen und Oszillatoren als Taktgeber

Die nachfolgend aufgeführten Frequenzen sind typische Beispiele für häufig verwendete Taktfrequenzen - sie erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da auch andere Frequenzen möglich sind. Es handelt sich zudem um Systemtakte, nicht um Sendefrequenzen.

Kabelgebundene Kommunikation / Schnittstellen

Zu Anwendungen in der kabelgebundenen Kommunikation gehören beispielsweise:

- CAN-Bus (Controller Area Network), meist mit 12 MHz, 16 MHz oder 26 MHz
- UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), zum Beispiel mit 1,8432 MHz oder einem Vielfachen davon
- USB 2.0/3.0 und High-Speed USB (Universal Serial Bus), häufig mit 20 MHz, 24 MHz oder 25 MHz
- Ethernet und Gigabit Ethernet, unter anderem mit 10 MHz, 25 MHz, 50 MHz, 100 MHz und 125 MHz
- PCI Express (Peripheral Component Interconnect) mit 25 MHz, 50 MHz und 100 MHz.

Kabellose Kommunikation

Die gesamte Infrastruktur von kabellosen Anwendungen, zum Beispiel dem Mobiltelefonnetz, basiert auf Frequenzen und somit zu großen Teilen auf Quarzen und Oszillatoren. Einige gängige Technologien und Frequenzen sind nachfolgend aufgeführt.

- 3G/4G/5G/LTE (Long Term Evolution): 19,2 MHz, 25 MHz und 38,4 MHz
- Bluetooth: 16 MHz, 24 MHz und 26 MHz
- GPS (Global Positioning System): 16,384 MHz und 26 MHz
- ISM (Industrial, Scientific and Medical Band): 16 MHz, 27,12 MHz und 32 MHz
- RFID (Radio Frequency Identification): 13,56 MHz und 27,12 MHz
- Wi-Fi: 20 MHz, 40 MHz und 48 MHz

11. FAZIT

Frequenzprodukte sind eine grundlegende Voraussetzung für den sicheren und präzisen Betrieb vieler moderner elektronischer Systeme. Quarzbasierte Taktgeber haben sich dabei aufgrund ihrer hohen Frequenzstabilität, ihres reproduzierbaren Temperaturverhaltens und ihrer langfristigen Zuverlässigkeit als Standardlösung etabliert. Das Verständnis der physikalischen Grundlagen, der wichtigsten Quarzparameter sowie der Oszillatorschaltung ist essenziell, um eine stabile und spezifikationsgerechte Takterzeugung zu gewährleisten. Abhängig von den Anforderungen an Genauigkeit, Baugröße, Entwicklungsaufwand und Kosten stellen integrierte Oszillatoren eine leistungsfähige Alternative dar, wodurch für jede Applikation eine optimale Taktlösung realisiert werden kann.

APPLICATION NOTE

ANQ001 | Frequenzprodukte - Grundlagen von Quarzen und Oszillatoren als Taktgeber

WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE“ genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von www.we-online.com heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen. Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden

hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfälle ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt.

Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

NÜTZLICHE LINKS



Application Notes

www.we-online.com/appnotes



REDEXPERT Design Platform

www.we-online.com/redexpert



Toolbox

www.we-online.com/toolbox



Produkt Katalog

www.we-online.com/products

KONTAKT INFORMATION



appnotes@we-online.com

Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany

www.we-online.com

APPLICATION NOTE

ANQ001 | Frequenzprodukte - Grundlagen von Quarzen und Oszillatoren als Taktgeber

REVISIONSHISTORIE

Dokument Version	Veröffentlichungsdatum	Änderungen
ANQ001a	2026/06/12	Ursprüngliche Version der Application Note

Hinweis: Die aktuelle Version des Dokuments und das Veröffentlichungsdatum sind in der Fußzeile jeder Seite dieses Dokuments angegeben.