

# Die Auswirkungen des Alterns von Quarzoszillatoren in Präzisions-Zeitmessanwendungen mindern

In diesem Beitrag geht es darum, wie sich die Alterung von Quarzoszillatoren auf die Leistung in Präzisions-Zeitmessanwendungen auswirkt und welche Abhilfemaßnahmen eingesetzt werden, um Alterungseffekte auf das Timing zu minimieren.



Anwendungen wie Raketensteuerungs- und Navigationssysteme, bei denen Temperatur- und Frequenzstabilität von entscheidender Bedeutung sind. Quarzoszillatoren sind auch eine gute Wahl für hochauflösende Videodisplays, wo alles außer überragender Performance klar und deutlich sichtbar wird.

Ein weiterer Bereich, in dem Quarzoszillatoren zum Einsatz kommen, ist die Ansteuerung hochfrequenter, feldprogrammierbarer Gate-Arrays (FPGAs). In diesen Anwendungen führt der geringere Jitter von Quarzoszillatoren zu breiteren Augendiagrammen und niedrigeren Bitfehlerraten (BER). Noch ein Punkt sind High-Speed-A/D-Wandler, bei denen der geringere Jitter der Quarzoszillatoren zu einem geringeren Phasenrauschen führt.

In all diesen Anwendungen wird nichts von dem bislang Bekannten jemals den Gütefaktor und die spektrale Reinheit und Stabilität von Quarz erreichen. Dennoch ist es wichtig, die intrinsischen Alterungseffekte von Quarzoszillatoren auf die Zeitmessleistung zu erkennen und zu berücksichtigen.

Dieser Artikel befasst sich mit diesem Phänomen und den Methoden, die von Oszillatorherstellern wie Q-Tech und AXTAL eingesetzt werden, um diese Auswirkungen zu mindern.

### Ursachen der Quarzalterung

Alterungsprozesse in Quarzoszillatoren wirken sich direkt auf Zeitmessanwendungen aus, indem sie im Laufe der Zeit eine allmähliche und irreversible

Die Alterung von Quarzoszillatoren wirkt sich direkt auf Zeitmessanwendungen aus, indem sie im Laufe der Zeit eine allmähliche und irreversible Abweichung der Ausgangsfrequenz des Oszillators verursacht. Bei Anwendungen mit hoher Zeitgenauigkeit müssen im Herstellungsprozess Maßnahmen zur Risikominderung ergriffen werden, um die Auswirkungen der Alterung zu minimieren.



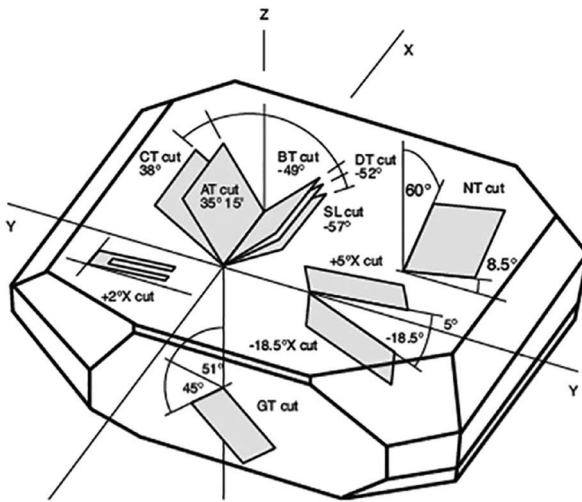
Autor:  
Ron Stephens  
ehemaliger Präsident  
Q-Tech Corp.  
<https://q-tech.com/>

### Quarzoszillatoren in Zeitmessanwendungen

Warum ist der klassische High-Performance-Quarzoszillator in vielen Anwendungen immer

noch die beste Wahl, angesichts einer so großen Auswahl an elektronischen Zeitmessgeräten? Eine Teilantwort darauf sind die Vorteile in High-Performance-Umgebungen, bei denen ein Service Call (Serviceeinsatz) schlichtweg nicht in Frage kommt. Der Weltraum ist ein solcher Bereich, von der niedrigen Erdumlaufbahn (LEO) über die geosynchrone Umlaufbahn bis hin zu Satelliten im tiefen Weltraum. Ein weiterer Bereich sind Hochtemperaturanwendungen wie Bohrungen.

Weitere Anwendungsbereiche, in denen Quarz-Zeitmessgeräte die bessere Wahl sind, sind militärische und avionische



**Bild 1:** Heutzutage wird bei Quarzkristallen am häufigsten der AT-Schnitt verwendet. Der doppelt gedrehte SC-Schnitt trägt zusätzlich zur Stabilität und Alterungsbeständigkeit von OCXO-Oszillatoren bei

Abweichung der Ausgangsfrequenz des Oszillators verursachen. Insbesondere bei Präzisions-Zeitmessanwendungen, die Strahlungstoleranz, geringes Rauschen und Jitter und/oder einen Betrieb bei hohen Temperaturen erfordern, sind im Herstellungsprozess außergewöhnliche Maßnahmen zu ergreifen, um die Auswirkungen der Alterung zu minimieren.

Alterung bezeichnet die allmähliche Veränderung der Ausgangsfrequenz des Quarzoszillators im Laufe der Zeit. Dieses Phänomen ist in erster Linie auf physikalische und chemische Veränderungen innerhalb des Quarzkristalls und seiner Umgebung zurückzuführen. Diese Drift, die in der Regel entweder in Teilen pro Million (ppm) oder Teilen pro Milliarde (ppb) pro Jahr gemessen wird, kann bei Anwendungen, die präzise und stabile Zeitreferenzen erfordern, zu erheblichen Problemen führen.

Es gibt viele Ursachen für die Alterung von Schwingquarzen. Zwei der mit Abstand wichtigsten sind Massenbelastung und Spannungsänderungen.

Massenbelastung bezieht sich auf subtile Veränderungen der Masse des Quarzelements aufgrund der Absorption oder

Desorption von Verunreinigungen auf der Kristalloberfläche, welche seine Masse und damit seine Resonanzfrequenz verändern. Quarzkristalle werden in Reinräumen verarbeitet und in sehr sauberen Umgebungen verschlossen, entweder im Vakuum oder in einer nicht reaktiven, inerten Stickstoff-Helium-Atmosphäre. Nichtsdestotrotz bleibt immer ein gewisser Anteil an unerwünschtem Material zurück. Typischerweise handelt es sich hierbei um eine sehr geringe Menge Wasserdampf, die jedoch zu massiven Belastungsänderungen führen kann, was wiederum eine Frequenzalterung zur Folge hat.

Spannungsänderungen – Auch wenn große Anstrengungen unternommen werden, um die mechanische Belastung des Kristalls zu minimieren, bleibt immer eine gewisse mechanische Restspannung bestehen. Insbesondere bei der Befestigung des Quarzelements an seinem Gehäuse und in der Oszillatorschaltung. Diese Befestigungsstruktur besteht in der Regel aus einem sehr spannungsarmen Metallband, das über ein sehr ausgasungsarmes Epoxidharz oder einen Klebstoff mit dem Quarz verbunden ist. Dennoch werden im Laufe der Zeit einige

Veränderungen der Belastung durch diesen Aufbau den Quarzresonator und seine Frequenz beeinflussen. Zweitens kann es zu Veränderungen der inneren Spannungen in den Metallelektroden des Kristalls und sogar im Quarz selbst kommen.

Während Massenbelastung und Spannungsänderungen die Hauptursachen für die Alterung von Quarzoszillatoren sind, gibt es noch weitere Ursachen, darunter Ausgasung, Diffusionseffekte, chemische Reaktionen, Druckänderungen und die Alterung der Oszillatorschaltung (insbesondere Änderungen der Lastreaktanz und des Ansteuerungspegels).

## Wichtige Auswirkungen des Alterns auf Zeitmessanwendungen

**Frequenzdrift:** Mit zunehmendem Alter des Oszillators kann dessen Frequenz ansteigen oder abfallen, wodurch der Systemtakt etwas schneller oder langsamer als vorgesehen läuft. Dies ist besonders problematisch in Systemen, in denen sich selbst geringfügige Abweichungen über Stunden, Tage oder Jahre hinweg zu erheblichen Zeitfehlern summieren können.

**Holdover-Leistung:** In kritischen Zeitmesssystemen – wie Satelliten, Netzwerkinfrastrukturen und Messgeräten – dienen Oszil-

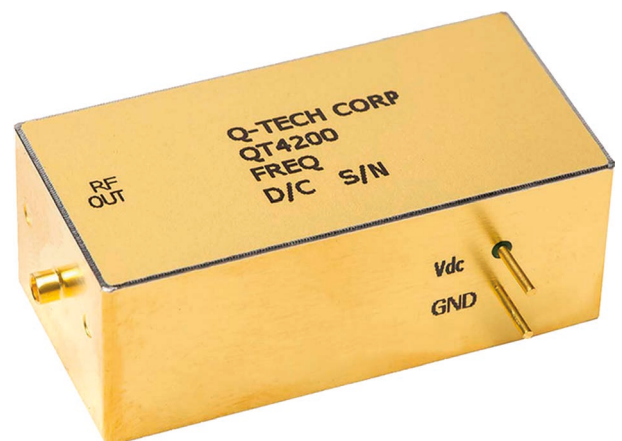
latoren häufig als Backup-Uhren, wenn externe Referenzen (wie GPS) nicht verfügbar sind. Während dieser Haltezeit („holdover“) muss der lokale Oszillator ein genaues Timing aufrechterhalten. Durch Alterung verursachte Frequenzabweichungen können die Genauigkeit der Zeitübernahme beeinträchtigen und zu Synchronisationsfehlern in Netzwerken oder Datenverlusten in zeitkritischen Anwendungen führen.

**Langfristige Zuverlässigkeit:** Bei längerem Betrieb kann der kumulative Effekt der Alterung die Frequenz des Oszillators außerhalb der für die Anwendung akzeptablen Grenzen bringen, was eine Neukalibrierung, einen Austausch oder Kompensationsmechanismen erforderlich macht.

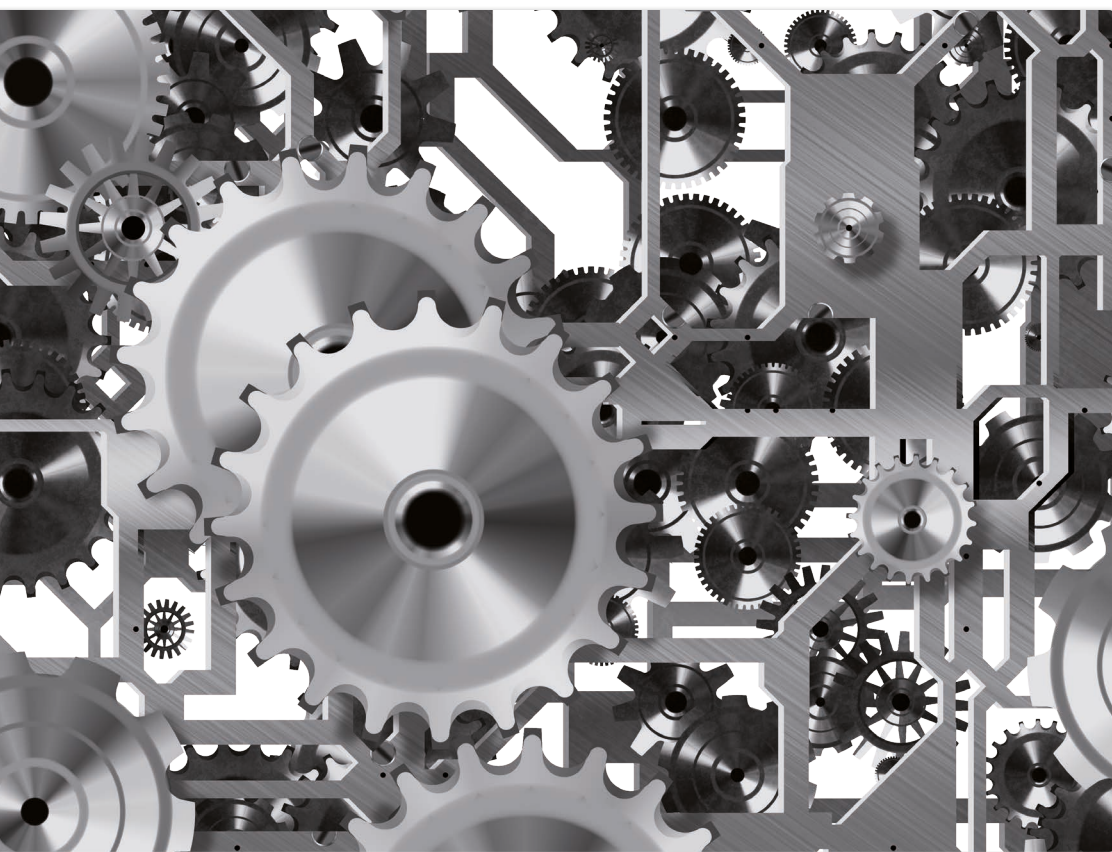
**Umweltsensibilität:** Alterungseffekte können durch Umweltfaktoren wie Temperaturschwankungen und Stromausfälle verstärkt werden, wodurch die Zeitmessung weiter destabilisiert wird.

## Strategien zur Risikominimierung

Dazu gehören der Einsatz von Oszillatoren mit von Natur aus geringen Alterungsraten, die Implementierung von Kompensationsalgorithmen und die Entwicklung von Systemen,



**Bild 2:** Der für den Weltraumeinsatz qualifizierte OCXO QT4200 von Q-Tech beinhaltet einen SC-Schnitt-Quarz in einem kaltverschweißten Gehäuse. Seine 15-jährige Alterung ist auf 1,5 ppm festgelegt.



die eine Neukalibrierung oder Redundanz bei Zeitquellen ermöglichen.

Für die Herstellung von Quarzkristallen mit sehr geringer Alterung sind Sauberkeit und Kontaminationskontrolle während der Verarbeitung von größter Bedeutung. Als nächstes muss der Quarzresonator in einer extrem hermetischen Umgebung versiegelt werden, entweder in einem widerstandsverschweißten oder, noch besser, kaltverschweißten Gehäuse. Zusätzlich kann eine lange Temperung bei hohen Temperaturen die anfänglichen Frequenzänderungen beschleunigen.

Ein weiterer Ansatz ist die Voralterung. Vor der Auslieferung werden Präzisionsquarze häufig werkseitig „vorgealtert“, um die anfängliche schnelle Alterungsphase zu beschleunigen. Dadurch wird sichergestellt, dass der Oszillator seine spezifizierte Alterungsrate im Einsatz schneller erreicht. Hochwertige Quarze im SC-Schnitt (stress-compensated) oder AT-Schnitt werden aufgrund ihrer überlegenen Langzeitstabilität und

geringeren intrinsischen Alterungsraten ausgewählt, wobei SC-Schnitt-Quarze in Quarzoszillatoren eine besseres Alterungsverhalten bieten als die typischerweise verwendeten AT-geschnittenen Typen (Bild 1).

Der Alterungsprozess von Schwingquarzen verlangsamt und verbessert sich mit der Zeit, wobei in den ersten Monaten und Jahren mehr Veränderungen zu beobachten sind als in den folgenden Zeiträumen. Beispielsweise kann bei Standard-Quarzoszillatoren, bei denen der Quarzresonator in derselben Umgebung wie der Rest der Oszillatorschaltung untergebracht ist, die typische Alterungsrate im ersten Jahr  $\pm 1$  bis  $\pm 5$  ppm und in den folgenden Jahren  $\pm 0,5$  bis  $\pm 2$  ppm betragen.

Die militärische Standardspezifikation MIL-PRF-55310 (und ihr Vorgänger MIL-O-55310), legt die Alterung von Quarzoszillatoren genau fest und schreibt einen 30-tägigen Alterungstest bei einer erhöhten Temperatur von mindestens  $70^\circ\text{C}$  vor, wobei streng definierte Grenzwerte für die zulässige Frequenzänderung

gelten. Darüber hinaus enthalten die militärischen Spezifikationen mathematische Gleichungen, mit denen die Daten aus 30 Tagen Alterung extrapoliert werden können, um die ungünstigste Alterung über längere Zeiträume vorherzusagen. Bei Q-Tech und AXTAL werden Quarzoszillatoren, die für den Einsatz in zeitkritischen Anwendungen vorgesehen sind, auf die Einhaltung der Norm MIL-PRF-55310 geprüft.

In Zeitmessanwendungen, die eine noch bessere Performance erfordern, wird der Quarzresonator in einer eigenen, separaten hermetischen Umgebung eingeschlossen, in der Regel in einem kaltverschweißten (ColdWeld-, CW-) Gehäuse. Kaltverschweißen ist ein Festkörper-Schweißverfahren, bei dem die Verbindung ohne Verschmelzung oder Erwärmung an der Schnittstelle der beiden zu verschweißenden Teile erfolgt. Anders als beim Schmelzschweißen ist in der Verbindung keine flüssige oder geschmolzene Phase vorhanden. Die geringe zugeführte Wärme minimiert die Ausgasung.

Mit dieser Art von Schwingquarzen können TCXOs (temperaturkompensierte XO) im ersten Jahr typische Alterungsraten von  $\pm 0,2$  bis  $\pm 1$  ppm erreichen, in den folgenden Jahren dann  $\pm 0,1$  bis  $\pm 0,5$  ppm oder sogar noch bessere Werte. Für hochstabile OCXOs werden Alterungsraten von  $\pm 0,03$  bis  $\pm 0,1$  ppm im ersten Jahr und  $\pm 0,05$  ppm oder besser erreicht.

## Fazit

Die Alterung, ein unvermeidbares Merkmal von Quarzoszillatoren, kann zu einer allmählichen Frequenzdrift führen und die Langzeitstabilität in kritischen Zeitmessanwendungen beeinträchtigen. Das Verständnis und die Minderung dieser Effekte durch ein geeignetes Design und sorgfältig kontrollierte Fertigungsprozesse sind unerlässlich, um eine zuverlässige Oszillatoralterung in Präzisionsanwendungen zu gewährleisten.

Q-Tech und AXTAL haben eine jahrzehntelange Geschichte und einen ausgezeichneten Ruf als Anbieter von Quarzoszillatoren mit außergewöhnlicher Qualität und langfristiger Zuverlässigkeit. Unsere Produkte werden in Reinraumumgebungen hergestellt, die die strengsten Standards erfüllen und übertreffen, um die Auswirkungen der Alterung zu mindern.

## Wer schreibt:

Ronald Stephens ist der frühere Präsident der Q-Tech Corporation. Er hat Abschlüsse in Physik, Mathematik und Operations Research und verfügt über 47 Jahre Erfahrung in der Quarzoszillatorbranche. Er ist ehemaliger Vorsitzender der Piezoelectric Products Group und der Piezoelectric Conference and Exhibition der EIA (U.S. Energy Information Administration). Im Jahr 2017 verlieh ihm das IEEE Frequency Control Symposium den C.B. Sawyer Memorial Award „für jahrzehntelange unternehmerische Führungsarbeit in der Frequenzregelungsbranche“. ◀