

all-electronics.de

# elektronik industrie

Was Entwickler wissen müssen

## MESSTECHNIK

Bauelemente-Charakterisierung: Impedanz-Analysator versus LCR-Meter S. 18

## EMBEDDED + DISPLAYS

Der schnelle Weg zur eigenen Connected-Edge-Lösung S. 30

## POWER

Modulare Stromverteilungsarchitektur in New-Space-Anwendungen S. 50

QUARZALTERUNG UND DIE FREQUENZSTABILITÄT

# Keine Angst vorm Älterwerden

12

wdi ag

# Keine Angst vor dem Älterwerden

## Quarzalterung und die Auswirkungen auf die Frequenzstabilität

In Oszillatorschaltungen können Alterungsprozesse beim verwendeten Quarzkristall zu Abweichungen von der Frequenz oder sogar zum Ausfall des gesamten Systems führen. Welche Ursachen es für die Alterung von Quarzen gibt und wie sie minimiert werden kann, zeigt dieser Beitrag.

*Autor: Hendrik Nielsen*

Bei der Entwicklung von Leiterplatten spielt die Wahl des richtigen Taktgebers eine entscheidende Rolle, um eine optimale Leistung zu erreichen. Am gebräuchlichsten sind quarzbasierte Oszillatoren, die ein Taktsignal mit stabiler Frequenz in Form einer logikkompatiblen Rechteckschwingung erzeugen. Dieses Signal synchronisiert die anderen elektronischen Bauteile eines Systems und ist damit existenziell wichtig für ein einwandfrei funktionierendes Endprodukt. Allerdings findet oft die Alterung der Komponenten viel zu wenig Beachtung. Diese kann jedoch bei Oszillatorschaltungen zu erheblichen Frequenzfehlern führen. Zwar gehören die frequenzgebenden Produkte zu den hochwertigsten Komponenten am Markt für elektronische Bauteile, jedoch ist das keine Garantie, dass ihre Leistung unbegrenzt stabil bleibt.

### Entstehung von Quarzen

Herzstück der meisten Oszillatoren ist kristallines Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), oder einfacher gesagt – Quarz. Die Quarzzucht erfolgt durch Hydrothermalsynthese aus einer wässrigen Lösung in großen Autoklaven bei Temperaturen zwischen 350 und 400 °C und Druck zwischen 100 und 120 MPa. Als Nährstoff werden natürliche Quarzsteine verwendet, die sich unter diesen Bedingungen langsam auflösen. Aufgrund des Temperaturdifferentials, das in den Autoklaven aufrechterhalten wird, fließt die so entstandene Lösung in die Wachstumszone des Autoklavs, um dort zu reinen Quarzen heranzuwachsen. Mit dieser Methode entstehen perfekt gezüchtete Quarzkristalle von hoher Reinheit und Qualität, die sich auch für aktuelle Anwendungen eignen.

Der entstandene Quarzbarren wird anschließend in Wafer geschnitten. Da die Temperaturstabilität des Quarzes vom Schnittwinkel abhängt, ist eine präzise

Schnittführung von besonderer Bedeutung. 90 Prozent aller Quarze werden mit dem AT-Schnitt gefertigt. Dabei erfolgt der Schnitt in einem Winkel von 35° 15' zur Z-Achse des ursprünglichen Barrens. Um Quarze (Blanks) zu gewinnen, die den hohen Anfor-





derungen an die Winkelgenauigkeit entsprechen, müssen größere Mengen produziert werden, die später kontrolliert und sortiert werden. Quarzblanks, die aus der Toleranz fallen, eignen sich für andere Anwendungen mit weniger genauen Spezifikationen. Sind die Blanks gefertigt, muss der Quarz geschliffen, geläppt, geätzt und poliert werden, bis er die richtige Dicke hat und auf der gewünschten Nennfrequenz schwingt. Dann kann der Blank in das entsprechende Gehäuse verbaut und einer Endkontrolle unterzogen werden. Bei allen Arbeitsschritten ist große Sorgfalt nötig, sonst können Absplitterungen, Risse, Kratzer oder Parallelitätsverluste zu Fehlfunktionen wie Störsignalen oder unter Umständen zu plötzlichen Frequenzänderungen führen.

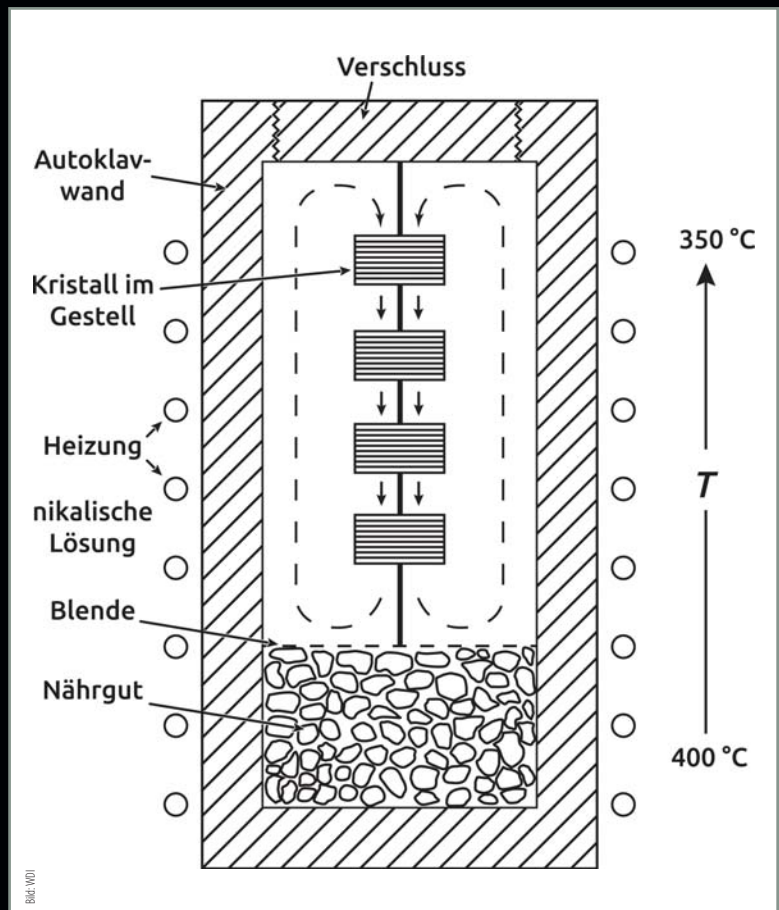
Doch auch nach dem sorgfältigsten Herstellungsprozess gibt es vier Hauptfaktoren, die Einfluss auf die Stabilität der Nennfrequenz eines Quarzes nehmen. Neben Umgebungstemperatur, zugeführter Versorgungsspannung und der vom Quarz aufgenommenen Leistung (Drive Level) ist die Alterung des Quarzes einer der häufigsten Gründe, warum es in einer Oszillatorschaltung zu Frequenzabweichungen und allenfalls zum Ausfall des gesamten Systems kommt.

### Quarzalterung und ihre Ursachen

Der Begriff Quarzalterung beschreibt eine langfristige Frequenzänderung, die im Laufe der Zeit durch Veränderungen der Umgebung oder des Quarzes selbst hervorgerufen wird. Eine gute Analogie wäre das Einlaufen neuer Schuhe. Anfangs verändert sich die Passform schneller, aber wenn sie eingelaufen sind, passen sie immer besser und fühlen sich schließlich gut an.

Es gibt eine Vielzahl von Faktoren, die eine Quarzalterung verursachen und unterschiedliche Quarze altern unterschiedlich schnell. Einige Faktoren sind bedingt durch den Herstellungsprozess, andere durch die Art der Verwendung.

Einige Beispiele, die zu einer stärkeren Alterung und damit zu Abweichungen der Quarzeigenschaften, insbesondere Frequenzdrifts, führen können, sind:



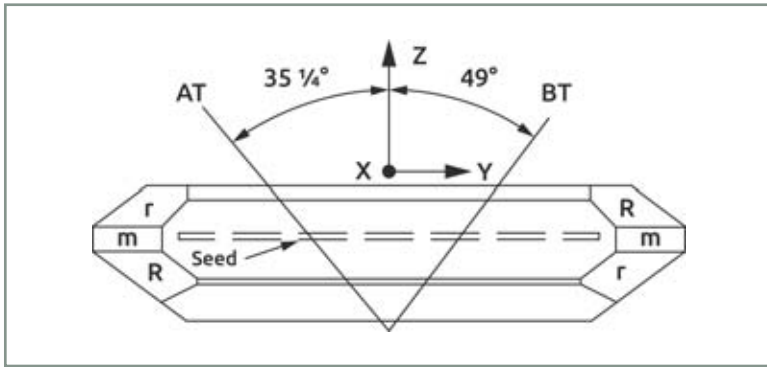
- Veränderung der Oberfläche des Quarzblanks durch chemische oder physikalische Einflüsse
- Verunreinigungen des Quarzes, die in das Kristallgitter eindringen und die strukturelle Integrität beeinträchtigen
- Temperaturschwankungen, die dazu führen, dass sich die Kristallgitterstruktur des Quarzes ausdehnt oder zusammenzieht und somit zu Spannungen führt.
- Drahtermüdung durch Belastung der Verbindungsdrähte im Quarzgehäuse
- Reibungsverschleiß durch mechanische Beanspruchung
- Zu hoher Ansteuerungspegel (Drive Level), der dazu führen kann, dass der Quarz zu sehr belastet wird.

**Bild 1:** Prinzipieller Aufbau eines Autoklavs zur Hybridthermalsynthese.

Diese Faktoren können individuell oder in Kombination auftreten und die Geschwindigkeit der Quarzalterung variiert demzufolge. Außerdem weisen Frequenzschwankungen keinen linearen Verlauf auf. Die Frequenz steigt oder sinkt nicht kontinuierlich; sie kann in einem Jahr ansteigen und im nächsten Jahr abnehmen. Ist die Alterung eines Quarzes beispielsweise mit maximal  $\pm 5$  ppm pro Jahr spezifiziert, folgt daraus nicht, dass die Alterung nach 5 Jahren  $\pm 5$  ppm  $\times$  5 Jahre, also  $\pm 25$  ppm beträgt. In der Praxis kann eine Alterung von  $\pm 5$  ppm im ersten Betriebsjahr nur

### Eck-DATEN

Quarzalterung beschreibt eine langfristige Frequenzänderung, die im Laufe der Zeit durch Veränderungen der Umgebung oder im Quarz selbst ausgelöst wird. Es gibt verschiedene Ursachen für die Quarzalterung, von denen einige vom Herstellungsprozess und andere von der Nutzung abhängen. Die Reinheit der Quarzumgebung ist ein entscheidender Faktor, der die Alterung beeinflusst. Um die Auswirkungen zu minimieren und sicherzustellen, dass die vorgegebenen Standards eingehalten werden, sind präzise Messungen der Alterung nötig.

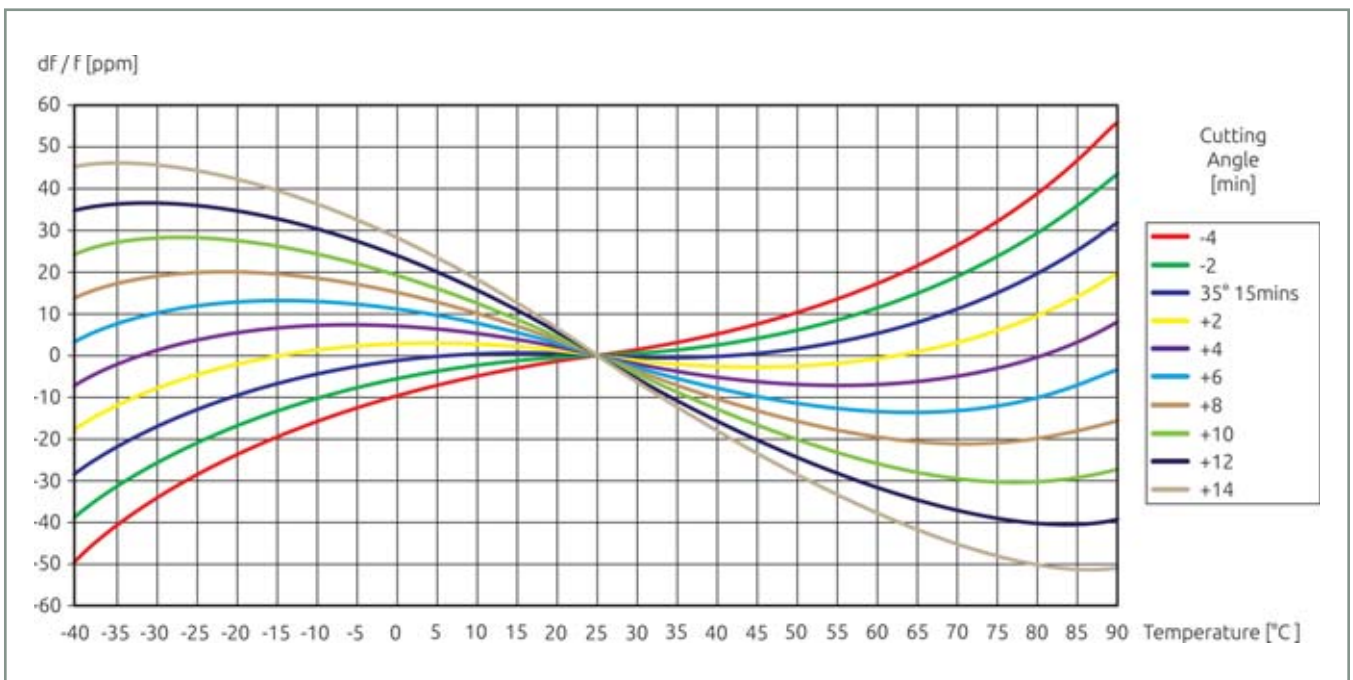


**Bild 2: Die verschiedenen Quarzschnitte. Die Lage der X/Y/Z-Achsen werden mit Hilfe eines Röntgengerätes ermittelt.**

±1 ppm bis ±2 ppm betragen und sich dann in den folgenden Jahren verringern. Den langfristigen Verlauf eines alternden Quarzkristalls vorherzusagen, ist nahezu unmöglich, da selbst Teile, die zur gleichen Zeit und aus derselben Charge Quarz hergestellt wurden, leicht unterschiedliche Alterungsmerkmale aufweisen.

In der Regel folgt die Quarzalterung einer logarithmischen Kurve, wobei die höchste Änderungsrate der Frequenz unmittelbar nach der Herstellung auftritt und dann im Laufe der Zeit allmählich abnimmt. Als Richtlinie gilt hierfür, dass die größten Veränderungen in den ersten 45 Tagen nach der ersten Inbetriebnahme auftreten. Dennoch ist auch während der gesamten Lebensdauer des Kristalls eine gewisse Alterung zu beobachten. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, werden Quarze mit engen Toleranzen vor der Auslieferung für eine gewisse Zeit, bei höchstpräzisen Produkten sogar mehrere Monate, kontinuierlich betrieben und somit vorgealtert. Sobald sich die Alterungsraten stabilisiert haben, können die Hersteller typische Werte für verschiedene Quarztypen angeben.

**Bild 3: Temperaturkurve eines AT-Schnittquarzes. Abweichungen des Schnittwinkels wirken sich auf den Verlauf der Kurve und die Frequenzstabilität des Endprodukts aus.**



Wenn der Quarzkristall in der gleichen Schaltung und bei der gleichen Temperatur betrieben wird, stabilisieren sich die Alterungseffekte nach einigen Betriebsjahren. Ändern sich jedoch Schaltung oder Temperatur, kann sich auch die Alterungsrate ändern.

### Minimierung von Alterungsprozessen

Um den Grad der Alterung sowohl während der Herstellung als auch während der Nutzung zu minimieren, gibt es verschiedene Maßnahmen.

Die Reinheit der Quarzumgebung ist hier einer der entscheidenden Faktoren, um die Alterung zu verringern. Daher ist es von größter Bedeutung, dass das Gehäuse oder die Verkapselung des Quarzes nicht beschädigt wird. Die Dichtung sollte intakt und eventuelle Pins sollten nicht verbogen sein, damit die Dichtung nicht beschädigt wird.

Während des Herstellungsprozesses sollten die Quarze in einer Inertgasumgebung eingeschlossen sein. Darüber hinaus sollten Hersteller die letzten Schritte der Quarzblankvorbereitung so präzise wie möglich durchführen. Aus diesem Grund wird der Blank nicht mechanisch bearbeitet, sondern chemisch geätzt, um ihn auf die erforderlichen Abmessungen zu bringen. Dadurch wird das Kristallgitter so wenig wie möglich gestört und das Eindringen von Verunreinigungen, die im Laufe der Zeit zu einer Alterung des Quarzes führen könnten, wird verringert.

Um die Alterung zu minimieren und sicherzustellen, dass die Spezifikationen eingehalten werden, sind auch präzise Messungen entscheidend. Hier gibt es verschiedene Methoden, die einen Kompromiss zwischen Zeit, Kosten und Genauigkeit darstellen. Die tatsächliche Alterung eines Quarzes kann man nur messen, indem man ihn in eine Schaltung integriert

und die Frequenz über die gesamte Lebensdauer des Produkts hinweg misst. Da dies in der Praxis jedoch nicht durchführbar ist, muss eine Methode her, die eine Lebensdauer von 10 oder 20 Jahren simuliert. Diese Methode ist das Backen des Quarzes, also die beschleunigte Alterung bei erhöhter Temperatur. In militärischen Spezifikationen gelten beispielsweise Temperaturen von 85 °C für 30 Tage und 105 °C für 168 Stunden als äquivalent für ein Jahr Betrieb bei einer Betriebstemperatur von 25 °C. In anderen Industrienormen ist häufig eine Alterung bei 85 °C für 1000 Stunden im ersten Jahr vorgesehen. Die Genauigkeit des Tests ist besser, wenn er über einen längeren Zeitraum bei niedrigeren Temperaturen durchgeführt wird.

### Datenerfassung

Nachdem die Zeit- und Temperaturparameter festgelegt wurden, stellt sich die Frage, wie die Daten erfasst werden sollen. Die erste Methode ist die passive Alterung. Hierbei werden die Komponenten in einer Serienfertigung hergestellt und vor und nach dem Backen bei Raumtemperatur im Messsystem gemessen. Diese Methode ist kostengünstig, geht jedoch zu Lasten der Genauigkeit. Mit der passiven Alterung können Hersteller Ausreißer erkennen und sie dient als Prozesskontrolle, die in der Herstellung auf mögliche Probleme hinweist.

Bei der aktiven Alterung ist jede Quarzeinheit in eine Oszillatorschaltung integriert, sodass Frequenzmessungen während der Aufenthaltszeit im Ofen durchgeführt werden. Die Messungen können mehrmals täglich erfolgen, wodurch für jede Einheit eine Datenkurve entsteht. Diese Kurve kann mathematisch angepasst und über die Zeit projiziert werden, was eine langfristige Vorhersage ermöglicht. Die aktive Alterungsmethode ermöglicht eine höhere Genauigkeit, geht jedoch gleichzeitig auch mit höheren Kosten einher. Ein weiterer Vorteil dieser aktiven Alterungsmethode besteht darin, dass sie auch die Auswirkungen des Drive Levels berücksichtigt. Denn wenn der Quarz während der Prüfung aktiv in Schwingung versetzt wird, entspricht dies eher den realen Betriebsbedingungen. Bei der passiven Alterung hingegen wird der Kristall während der Prüfung nicht zur Schwingung angeregt.

### Bedeutung für das Design-In

Da Quarz ein natürlicher Rohstoff ist, lässt sich seine Alterung nie ganz vermeiden. Aus diesem Grund kann es notwendig sein, Methoden zur präzisen Feinjustierung der Frequenz in Schaltungen vorzusehen, wenn eine hohe Frequenzgenauigkeit eine große Bedeutung hat. Ebenso ist eine regelmäßige Kalibrierung erforderlich, wenn eine präzise Frequenzgenauigkeit wichtig ist. In vielen Anwendungen ist



Bild: Roman - stock.adobe.com

dieses Problem möglicherweise auch gar nicht von großer Bedeutung und die Auswirkungen sind kaum wahrnehmbar oder können vernachlässigt werden.

Beim Entwurf einer Schaltung mit einem Quarz oder Oszillator sollte der Anwender in der Regel wissen, welche Stabilitätswerte er über einen bestimmten Zeitraum braucht. Die Bedeutung der Alterung nimmt dabei zu, je geringer die Toleranz und/oder Stabilität des Quarzes ist. Bei einem TCXO (temperaturkompensierter Quarzoszillator) mit einer Temperaturstabilität von  $\pm 1$  ppm muss die Alterung zum Beispiel auf niedrige Werte begrenzt werden. Wenn jedoch das gesamte Design eine Toleranz von  $\pm 200$  ppm aufweist und der verwendete Quarzbaustein eine Nennleistung von  $\pm 100$  ppm hat, ist eine geringfügige Alterung praktisch vernachlässigbar.

WDI bietet Unterstützung bei der Auswahl des, sowohl technisch als auch wirtschaftlich gesehen, geeigneten Taktgebers für spezifische Systeme an. Mit dem Quarzfinder steht dem Anwender auch ein Online-Suchwerkzeug zur Auswahl des geeigneten Quarzes, Resonators, Oszillators oder Real-Time-Clock-Moduls zur Verfügung. (bs) ■

**Bild 4:** Die Quarzzucht erfolgt aus einer wässrigen Lösung in großen Autoklaven.

**Autor**  
**Hendrik Nielsen**  
 Technical Sales Specialist  
 bei WDI

