

## Vibrationsempfindlichkeit von Quarzen und Quarzoszillatoren

Phasenrauschen und Jitter von Oszillatoren und Frequenzquellen wird für immer mehr Anwendungen zu einem wichtigen Qualitätskriterium. Neben dem statischen Phasenrauschen gibt es eine Änderung der Frequenz und des Phasenrauschens durch Vibration und Beschleunigungseffekte, die vielen Anwendern nicht bekannt ist.



Vergleich konventioneller Quarzhalter im HC-Gehäuse (links) und Halterung im TO-Gehäuse mit Dreipunktaufhängung (rechts)

Schwingquarze sind piezoelektrische Schwinger. Leider haben alle piezoelektrischen Schwinger bauartbedingt den Nachteil, dass der piezoelektrische Effekt auch invers funktioniert, d.h. Quarze reagieren auf äußeren, mechanischen Stress mit einer leichten Deformation des Kristallgitters. Diese Deformation sorgt für eine Veränderung der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von den auf den Kristall wirkenden Kräften.



Auf den Kristall wirken auch Kräfte, wenn er einer Beschleunigung ausgesetzt wird – sowohl bei konstanter Beschleunigung, wie der Erdbeschleunigung oder in einer Zentrifuge, als auch bei dynamischen Vorgängen, wie Schock und Vibration. Bereits der Einfluss der Erdbeschleunigung  $G$  kann relative Frequenzänderungen im Bereich  $10^{-10}$  bis  $10^{-7}$  hervorrufen; diese lassen sich mit hochpräzisen und -stabilen Ofenoszillatoren (Ovenized Crystal Oscillators, OCXOs) mit der

sog. 2G-Tipover-Messung auch erfassen (Abbildung 1).

Die Änderung der Frequenz in Abhängigkeit von einer auf den Quarz wirkenden Beschleunigung (Acceleration Sensitivity oder auch einfach G-Sensitivity) wird meist in parts per billion ( $10^{-9}$ ) pro  $G$  ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) ausgedrückt. Diese quasistatischen

Frequenzänderungen sind für die allermeisten Anwendungen in der Praxis von keiner oder nur von geringer Bedeutung.

### Das Problem

In der Praxis ist allerdings die „dynamische G-Sensitivity“, d.h. die Empfindlichkeit von Quarzen und Oszillatoren auf dynamische Beschleunigungsvorgänge, wie sie durch mechanische Schocks, Vibration und Luft-, Wasser- und Körperschall hervorgerufen werden, von weit aus größerer Bedeutung. Diese Einflüsse verursachen Frequenz- und Phasensprünge, wenn sie diskret auftreten oder erzeugen eine Frequenz- bzw. Phasenmodulation des Oszillatorsignals bei periodischer oder rauschähnlicher Anregung, was sich effektiv wie eine Verschlechterung des Phasenrauschens im Frequenzbereich bzw. des Jitters im Zeitbereich auswirkt.

Dies führt z.B. zu einer erhöhten Bitfehlerrate bei der Datenübertragung oder zu unerwünschten Mischprodukten mit Nachbar-

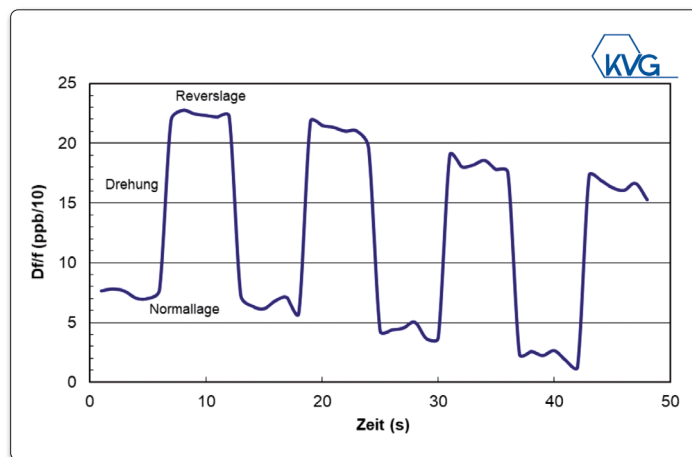
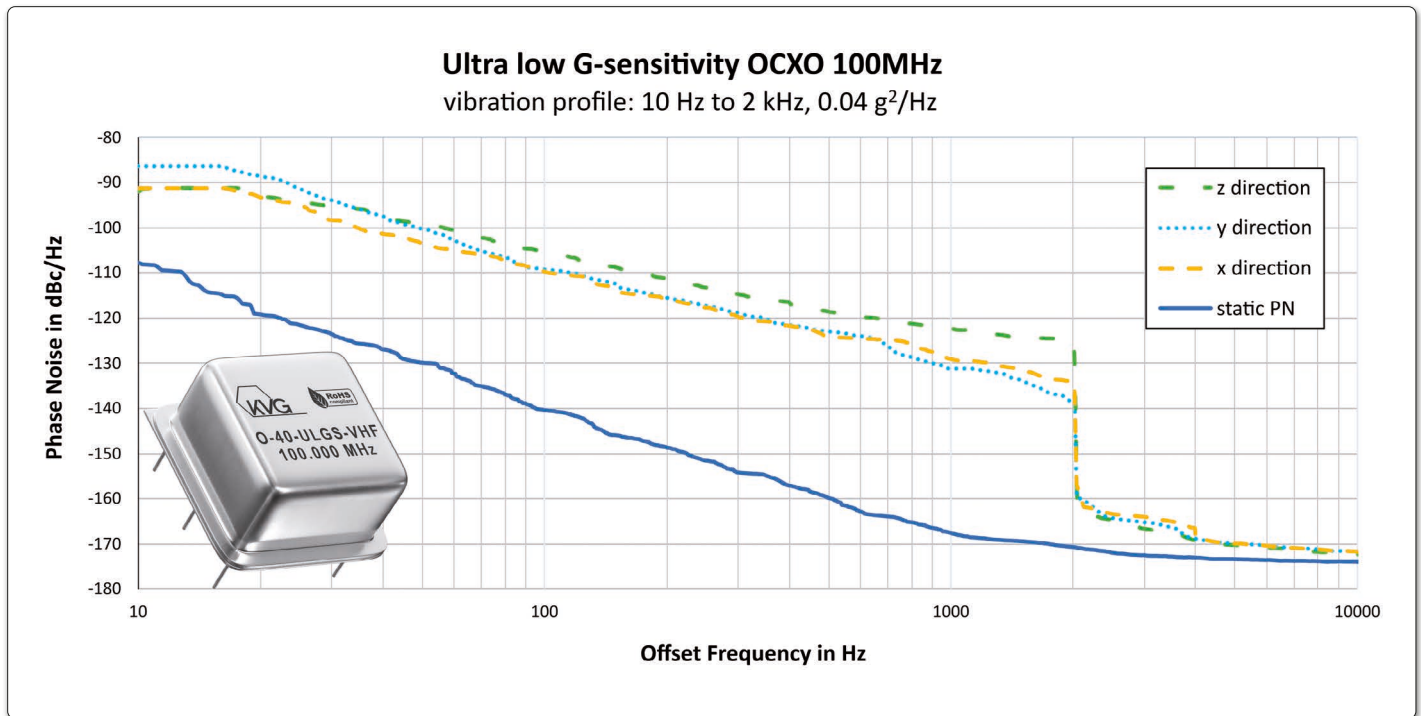


Abbildung 1: Messung der statischen Beschleunigungsempfindlichkeit durch „2G-Tipover“. Die Messung wurde mehrmals wiederholt, woraus sich das charakteristische Rechteckmuster in der Messkurve ergibt.

Autoren:

Dr. rer. nat. Julian Emmerich  
Dipl.-Ing. Harald Rudolph  
Produktmanagement  
KVG Quartz Crystal  
Technology GmbH  
www.kvg-gmbh.de



**Abbildung 2: Phasenrauschmessung eines Ultra low G-sensitivity OCXO der KVG Quartz Crystal Technology GmbH.**  
 Durch ausgewählte Quarze und geschicktes Oszillatordesign kann die G-Sensitivität unter Vibration auf ein Minimum reduziert werden.

kanälen. Eine typische Anwendung bei der dieser Punkt zum Tragen kommt, ist die mobile Mobilfunk-Basisstation, z.B. in Zügen. Aber auch für fest installierte Basisstationen an Gebäuden oder an Masten, die Erschütterungen durch vorbeifahrende Züge oder LKWs ausgesetzt sind, ist die dynamische G-Sensitivität eine wichtige Charakteristik. Durch die zum Teil sehr hohen Vibrationseinflüsse durch Turbinen oder Rotoren können beispielsweise auch kritische Anwendungen in Hubschrauber oder Flugzeuge betroffen sein und in besonders starkem Maße trifft dies auf die außerordentlich hohe Vibrationsbelastung durch Strahltriebwerke in Weltraumanwendungen zu.

Durch die Vielzahl der verschiedenen Einsatzbereiche werden auch die auftretenden Vibrationen oder Erschütterungen klassifiziert. Erschütterungen durch Straßenverkehr oder Schienenfahrzeuge erzeugen ein kontinuierliches Spektrum vor allem tiefer Frequenzen. Strahltriebwerke haben auch einen spektralen Anteil höherer Frequenzen und Motoren oder Generatoren sorgen für ein

diskretes Spektrum von Einzelfrequenzen. Weiterhin gibt es auch kurzzeitige Stoßbelastungen wie sie durch Hagelkörner auf Systeme im Außenbereich auftreten oder durch Schlagwerkzeuge beim Einsatz in Bergwerken oder der Schwerindustrie.

Wenn man die Auswirkungen der Vibrationen vorhersagen möchte, muss man zum einen die Beschleunigungsempfindlichkeit des Quarzoszillators in Abhängigkeit von der Vibrationsfrequenz kennen, als auch das anregende Vibrationsspektrum. Bei Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt oder auch militärischen Applikationen sind die Vibrationsspektren in der Regel bekannt und werden teilweise auch explizit in den Oszillatorspezifikationen festgelegt oder auf die entsprechenden MIL-STDs verwiesen.

### Messtechnik

Die einfachste Messmöglichkeit für die statische Beschleunigungsempfindlichkeit besteht darin, dass der Quarz in einem sehr stabilen Oszillator einmal in Ruhelage gemessen und

dann für die Vergleichsmessung der Oszillator einfach auf den Kopf gedreht wird. Da die Erdbeschleunigung nun in die entgegengesetzte Richtung wirkt ergibt sich eine definierte Frequenzabweichung, die ein Maß für die statische Beschleunigungsempfindlichkeit für die zweifache Erdbeschleunigung darstellt. Dieser Test wird in allen drei Raumachsen durchgeführt, um den Betrag der maximalen Beschleunigungsempfindlichkeit vektoriell zu ermitteln.

Nachteile des recht einfachen Verfahrens ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber anderen Umgebungseinflüssen, wie beispielsweise Temperaturschwankungen, die eine gemessene Frequenzabweichung von 10<sup>-9</sup> bis 10<sup>-10</sup> deutlich überlagern können. Ein exemplarisches Messergebnis ist in Abbildung 1 dargestellt, bei dem sich durch mehrmaliges Drehen des Messoszillators ein periodisches Rechteckmuster in der Frequenzabweichung ergibt.

Eine präzisere Messmöglichkeit ist die Beschleunigungsprüfung mit Hilfe eines Vibrationsmessstisches. Hierzu wird der aktive

Oszillator einer definierten Beschleunigung bei verschiedenen Vibrationsfrequenzen ausgesetzt. Dies resultiert in einer Frequenzmodulation der Quarzfrequenz, die zu einem definierten Spektrum mit Seitenbändern um den Träger – die Ruhfrequenz des Quarzes – führt. Durch Berechnung aus den bekannten Beschleunigungswerten und den gemessenen Störabständen der Seitenbänder zum Träger lässt sich die Beschleunigungsempfindlichkeit relativ zur Erdbeschleunigung in ppb/G berechnen.

Auch hier ist eine Messung in den drei orthogonalen Raumachsen mit anschließender Betragsbildung nötig. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse einer Phasenrauschmessung unter Vibration. Als Messobjekt wurde ein Ultra-low-G-sensitivity-OCXO der KVG Neckarbischofsheim verwendet. Das Vibrationsprofil hatte eine Stärke von 0,04 g<sup>2</sup>/Hz im Frequenzbereich 10 Hz bis 2 kHz. Die besten Oszillatoren der KVG erreichen durch geeignetes Design und die spezielle Wahl der verwendeten Quarze eine G-Sensitivität von besser 0,05 ppb/g. ◀