

# Eigenständige BAW-Oszillatoren – Vorteile gegenüber Quarzoszillatoren



## ABSTRACT

In diesem Anwendungsbericht stellen wir die BAW-Technologie von TI vor und beschreiben die Integration eines BAW-Resonators mit Oszillatorschaltung zu einem eigenständigen Oszillator sowie die Vorteile der Verwendung von BAW-Oszillatoren gegenüber Quarzoszillatoren. Zu den wichtigsten Vorteilen des BAW-Oszillators gegenüber einem Quarzoszillator gehören die erhöhte Flexibilität, eine verbesserte Temperaturstabilität, verbesserte Jitter-Leistung, erhöhte Störfestigkeit der Stromversorgung, erheblich bessere Vibrationsstabilität und eine erheblich bessere Stoßfestigkeit.

## Inhalt

<b>1 Einführung</b> .....	2
<b>2 BAW – Technologie – Übersicht</b> .....	2
<b>3 BAW-Oszillator-Integration</b> .....	2
<b>4 Quarzoszillator</b> .....	3
<b>5 Zusammenfassung Vergleich zwischen LMK6C/D/P/H BAW Oszillator und Quarzoszillator</b> .....	5
5.1 Flexibilität.....	5
5.2 Temperaturstabilität.....	6
5.3 Phasenrauschenmessung.....	6
5.4 Rauschunempfindlichkeit Stromversorgung.....	7
5.5 Mechanische Umdrehungen pro Minute.....	8
<b>6 Fazit</b> .....	10

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: BAW- und Basis-Chip-Integration.....	2
Abbildung 3-2: LMK6C/D/P/H BAW Oszillator Blockschaltbild.....	3
Abbildung 4-1: Blockschaltbild für SPXO-Quarzoszillator.....	3
Abbildung 4-2: Quarzoszillator mit PLL-Blockschaltbild.....	4
Abbildung 5-1: BAW-Oszillator Frequenzstabilität über den Temperaturbereich.....	6
Abbildung 5-2: LMK6P/D/H BAW Oszillator Differenzphasenrauschleistung (normalisiert).....	6
Abbildung 5-3: LMK6C BAW Oszillator, unsymmetrisch, Phasenrauschverhalten (normiert).....	7
Abbildung 5-4: LMKD/P/H Stoßwirkung bei 1500 g.....	8
Abbildung 5-5: LMK6C Stoßwirkung bei 1500 g.....	9
Abbildung 5-6: LMK6C/D/P/H BAW Oszillator vs. Quarzoszillator Vibrationsempfindlichkeit.....	9
Abbildung 5-7: LMK6P/D/H Lebensdauer Differenzialmodell.....	10
Abbildung 5-8: LMK6C Lebensdauer unsymmetrische Ausführung.....	10

## Marken

All trademarks are the property of their respective owners.

## 1 Einführung

Schwingquarzoszillatoren (XOS) beherrschen den Timing-Referenzmarkt seit über einem Jahrhundert, seit der Erfindung im Jahr 1920s. Diese Quarzoszillatoren finden Anwendung in einer breiten Palette von Produkten, von Low-End- (Echtzeituhr) bis hin zu High-End-Anwendungen (komplexe Funkgeräte, GPS-Geräte und Militär/Aero). In den letzten Jahrzehnten haben die mobile Kommunikation und die aufstrebenden Märkte für das Internet der Dinge (IoT) die Suche nach neuen Resonatortechnologien vorangetrieben, die weniger Strom bei kleinerem Formfaktor verbrauchen, um die Integration zu vereinfachen und dabei dieselbe oder bessere Leistung als Quarzkristalle anbieten zu können. In den letzten zehn Jahren wurden einige eigenständige Oszillatorprodukte mit verschiedenen Arten von Mikroresonatortechnologien auf den Verbrauchermarkt gebracht. Texas Instruments begann 2012 mit der Entwicklung seiner eigenen BAW-Resonatortechnologie (Bulk Acoustic Wave) mit dem Ziel fortschrittlicher Timing-Anwendungen. Seit 2018 hat Texas Instruments einige Systemprodukte auf den Markt gebracht, darunter den branchenweit besten Jitter-Cleaner (LMK05318-Familie) und das weltweit erste kommerzialisierte quarzlose BLE-Radio (CC2652RB-Familie). Auf der Grundlage der Massenproduktionserfahrung bei diesen Bausteinen bringt TI jetzt die eigenständigen Oszillatorprodukte auf BAW-Basis auf den Markt.

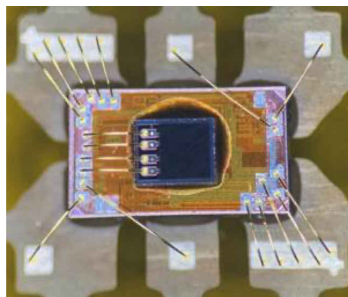
## 2 BAW – Technologie – Übersicht

Die BAW-Resonatortechnologie von TI nutzt piezoelektrische Transduktion, um eine hohe Q-Resonanz bei 2,5 GHz zu erzeugen. Der Resonator wird durch den vierseitigen Bereich definiert, der von oberen und unteren Elektroden überlagert wird. Abwechselnd hoch- und niederakustische Impedanzschichten bilden akustische Spiegel unter dem Resonanzkörper, um ein Austreten akustischer Energie in das Substrat zu verhindern. Darüber hinaus werden diese akustischen Spiegel auch auf dem Resonatorstapel platziert, um den Baustein vor Verunreinigungen zu schützen und Energieverluste in die Verpackungsmaterialien zu minimieren. Dieser einzigartige Dual-Bragg-Akustikresonator (DBAR) ermöglicht eine effiziente Anregung, ohne dass kostspielige Vakuummohlräume um den Resonator herum erforderlich sind. Infolgedessen ist der BAW-Resonator von TI immun gegen Frequenzdrift, die durch Adsorption von Oberflächenverunreinigungen verursacht wird, und kann direkt in einem nicht hermetischen Kunststoffgehäuse mit der Oszillatorschaltung in Standard-Oszillator-Footprints (3,2 mm × 2,5 mm und 2,5 mm × 2,0 mm) platziert werden.

## 3 BAW-Oszillator-Integration

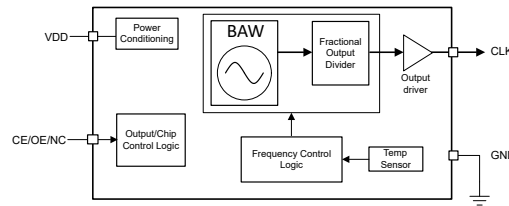
Die Bausteine LMK6C/D/P/H enthalten einen BAW-Resonator, einen Fractional Output Divider (FOD) und einen Ausgangstreiber, die zusammen eine vorprogrammierte Ausgangsfrequenz erzeugen. Temperaturschwankungen der Schwingungsfrequenz werden kontinuierlich von einem internen Präzisions-Temperatursensor überwacht und als Eingang in den Frequenzsteuerlogik bereitgestellt. Mit diesem Frequenzsteuerlogik-Block werden Frequenzkorrekturen intern durchgeführt, um die Ausgangsfrequenz innerhalb von  $\pm 25$  ppm über den gesamten Temperaturbereich und die Lebensdauer aufrechtzuerhalten. Der Ausgangstreiber kann sowohl einseitig geerdete LVCMOS- als auch differenzielle LVPECL-, LVDS- und HCSL-Ausgangsformate bereitstellen. Der Baustein enthält außerdem einen internen LDO, der das Stromversorgungsrauschen reduziert und daher einen rauscharmen Taktausgang bietet.

**Abbildung 3-1** Zeigt die Vorformintegration des BAW-Oszillators. Der BAW-Oszillator enthält einen Basis-Chip mit zusätzlichen IC-Schaltungen wie FOD, LDO und Temperatursensor sowie den BAW-Resonator-Chip. Das WLP (Wafer-Level Package) wird verwendet, um die Zuverlässigkeit des Bausteins in Bezug auf Vibrations- und Stoßfestigkeit zu erhöhen und um die Spannungsisolierung zu optimieren.



**Abbildung 3-1. BAW- und Basis-Chip-Integration**

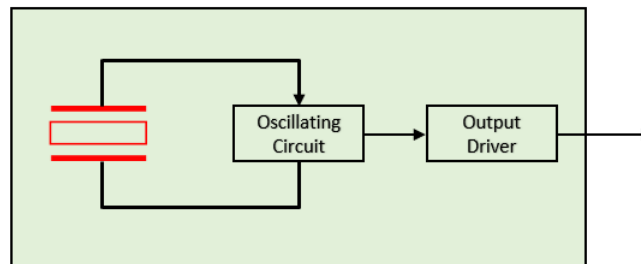
Die Ergebnisse sind einfache 4-polige (unsymmetrische LVCMOS) oder 6-polige (differenziell, LVPECL, LVDS, HCSL) Industriestandard-Gehäuse mit 3,2 mm × 2,5 mm oder 2,5 mm × 2,0 mm, die Pin-zu-Pin-kompatibel zu den Alternativen sind, die einen Drop-in-Ersatz ermöglichen.



**Abbildung 3-2. LMK6C/D/P/H BAW Oszillator Blockschaltbild**

## 4 Quarzoszillator

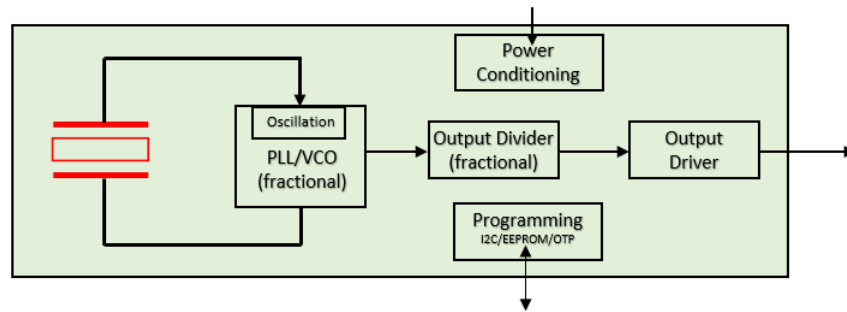
Quarzresonatoren werden mit zwei verschiedenen Methoden zu einem eigenständigen Oszillatorbaustein integriert; jede Methode bietet ihre eigenen Vor- und Nachteile. Die erste Methode besteht darin, den Quarzresonator mit der Schwingungsschaltung zu kombinieren und einfach den Ausgangstreiber hinzuzufügen, um verschiedene Ausgangstypen zu unterstützen – solche Oszillatoren werden in der Regel als SPXO-Oszillatoren in einem einfachen Gehäuse bezeichnet.



**Abbildung 4-1. Blockschaltbild für SPXO-Quarzoszillator**

Obwohl diese Lösung recht elegant ist und einen einfachen Aufbau, ein kleines Gehäuse und eine schnelle Startzeit (da es keine Kalibrierung gibt) bietet, ist der unterstützte Frequenzbereich sehr gering. Die Frequenzunterstützung ist ausschließlich vom verwendeten Quarzkristall abhängig. Um eine andere Ausgangsfrequenz zu unterstützen, muss ein anderer Quarz im Gehäuse montiert worden sein, da es keine Möglichkeit gibt, dies nachträglich zu ändern. Da die Frequenz des Quarzresonators umgekehrt proportional zur Dicke des Quarzes ist, sind Quarzresonatoren, die mit einer Grundfrequenz von über ~50 MHz arbeiten, eine Seltenheit, da sie äußerst schwierig zu handhaben und herzustellen sind. Eine gangbare Lösung besteht darin, mit einem ungeraden Oberton des Grundtons zu arbeiten, zum Beispiel mit einem Oberton dritter Ordnung, was bedeutet, dass er mit dem 3-fachen der Grundfrequenz arbeitet. Wenn ein Quarzresonator mit dem dritten Oberton arbeitet, ist sein Widerstand etwa 3-mal so hoch wie der des Grundtons, während seine Kapazität fast neunmal geringer ist – beides Veränderungen, die sich stark auf den Ruhestrom und die Möglichkeit zum Tunen des Quarzresonators auswirken.

Ein weiteres Verfahren zur Quarzintegration besteht darin, den Quarz als Referenz auf eine PLL-Schleife mit einem VCO zu verwenden, der mit einer viel höheren Frequenz (normalerweise in GHz) arbeitet. Von dieser GHz-Frequenz kann dann ein einfacher Teiler und Ausgangstreiber die spezifische Ausgangsfrequenz bereitstellen, die für den jeweiligen Ausgangstyp erforderlich ist. Eine Fractional-Engine kann entweder in der PLL oder im Ausgangsteiler hinzugefügt werden, um die Anzahl der Frequenzen zu erhöhen, die von einem einzelnen IC unterstützt werden. Diese Quarzoszillatoren verfügen über ein Kommunikationsprotokoll (I2C oder SPI) zur einfachen Registerprogrammierung.



**Abbildung 4-2. Quarzoszillator mit PLL-Blockschaltbild**

Diese Lösung ist zwar robust und flexibel, aber mit einem einzigen Silizium, das alle Frequenzen unterstützen kann, hat sie einige Nachteile. Da im Allgemeinen mehr Kernblöcke benötigt werden (PLL, Teiler usw.), führt dies zu einem größeren Gehäuse (5 mm × 3,2mm, 7mm × 5mm) und einem höheren Stromverbrauch (100+ mA). Schließlich führen die PLL-Kalibrierung und -sperre zu einer langsameren Startzeit, normalerweise von oder über 10 ms.

Die Kosten der Risikominimierung bei der Stromversorgung, da ein einziger Halbleiterbaustein alle potenziellen Frequenzen durch verschiedene Programmierungen unterstützt, sind hinsichtlich Größe, Stromverbrauch und Anlaufzeit offensichtlich.

## 5 Zusammenfassung Vergleich zwischen LMK6C/D/P/H BAW Oszillator und Quarzoszillator

Tabelle 5-1: LMK6C/D/P/H BAW-Oszillator Schlüsselspezifikation Vergleich zu Quarzoszillatoren

Parameter	LMK6C/D/P/H BAW Oszillator – Spezifikationen und Details	Quarzoszillator – Spezifikationen und Details	BAW-Vorteile gegenüber Quarz	Vorzüge
<b>Flexibilität</b>	Ein BAW-Chip und ein Basis-Chip (Einzel-IC-Lösung zur Unterstützung beliebiger Frequenzen, Spannungsversorgungen, Pin-zu-Pin-kompatibel)	Frequenzbeschränkungen	Reduziert Versorgungsbeschränkungen, ein einziger IC unterstützt alle Frequenzen	BAW-Oszillator
<b>Temperaturstabilität</b>	±10 ppm (Erhält die Temperaturstabilität unabhängig vom Temperaturbereich aufrecht)	Mit steigender Temperatur steigt auch die ppm-Stabilität	Höhere Stabilität bei erweitertem Temperaturbereich	BAW-Oszillator
<b>Jitter Bandbreite 12 kHz bis 20 MHz</b>	Max. 125 fs (LVDS, LVPECL, HCSL) Max. 500 fs (LVCMOS)	High-End-Leistung vergleichbar mit BAW	BAW passt gut zum Top-End des Quarzmarktes	Ähnlich
<b>Rauschunempfindlichkeit Stromversorgung</b>	-70 dBc (Spitzenstorn durch 50-mV-Einspeisung an 3,3-V-Stromversorgung von 50 kHz bis 1 MHz) (Integrierter LDO)	Hat in der Regel keinen integrierten LDO	Zur Leistungsoptimierung ist kein externer LDO oder DC/DC-Wandler erforderlich	BAW-Oszillator
<b>Vibration</b>	MIL_Std_883F Method 2002 Bedingung A (Der BAW-Oszillator erfüllt nicht nur die MIL-Norm, sondern verfügt auch über eine typische Vibrationsstabilität von ~1 ppb/g. Daher kommt es bei Vibrationen nur zu einem geringen Phasenrauschen.)	Erfüllt normalerweise nicht den MIL-Standard. Kann bis zu 10+ ppb/g hoch sein	Minimale Belastung durch Umgebungsbedingungen	BAW-Oszillator
<b>Stöße</b>	MIL_STD_883F Method 2007 Bedingung B (zusätzlich zur MIL-Norm, kann viel höhere Stoßbelastungen aushalten)	Erfüllt normalerweise nicht den MIL-Standard. Kann bei 2.000g ausfallen.	Minimale Belastung durch Umgebungsbedingungen	BAW-Oszillator

### 5.1 Flexibilität

Der LMK6C/D/P/H BAW-Oszillator ist eine Lösung mit einem einzigen IC (Single BAW-Chip + Single Base-Chip), die eine beliebige Ausgangsfrequenz von 1 MHz bis 400 MHz erzeugen kann – ähnlich wie ein PLL/VCO-basierter Quarzoszillator. Diese Lösung liegt allerdings bei den Spezifikationen viel näher an einem SPXO. Der BAW-Oszillator zeichnet sich durch eine kurze Anlaufzeit (<5 ms) aus, wird im branchenweit kleinsten Gehäuse (3,2 mm × 2,5 mm, 2,5 mm × 2,0 mm) geliefert und verfügt über einen typischen Stromverbrauch von 50 mA. Er kann mit 1,8 V, 2,5 V oder 3,3 V betrieben werden und ist Pin-to-Pin-kompatibel mit allen Oszillatoren der Mitbewerber. Der BAW-Oszillator unterstützt auch alle Standardausgangstypen einschließlich LVPECL, LVDS und HCSL für Differenzial- und LVCMOS für unsymmetrische Signale.

## 5.2 Temperaturstabilität

Quarz neigt zu einer hohen Temperaturzuverlässigkeit, wobei die Frequenz mit steigender Temperatur erheblich variiert. Die Unterstützung eines Bauteils mit 25 ppm bei erweiterter Industriequalität (115 Grad Celsius LVCMOS/105 Grad Celsius Differenzialausführung) ist ohne Hinzufügen einer Temperaturkompensationsschaltung nicht möglich. Der LMK6C/D/P/H BAW-Oszillator erbringt  $\pm 10$  ppm über den gesamten Temperaturbereich.

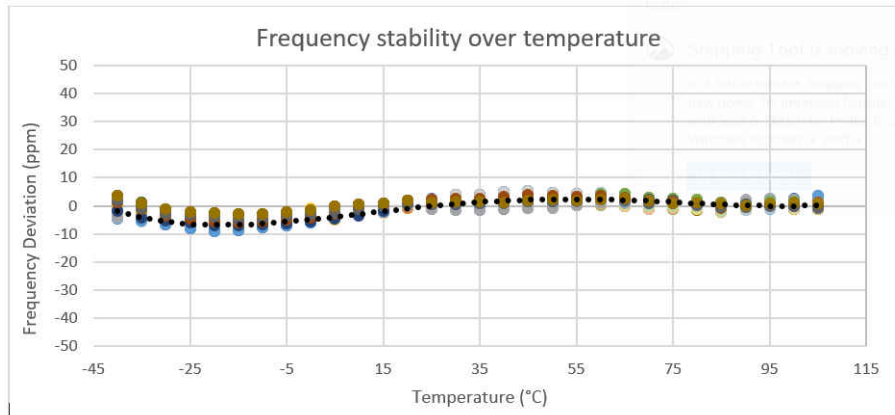


Abbildung 5-1. BAW-Oszillator Frequenzstabilität über den Temperaturbereich

## 5.3 Phasenrauschenmessung

Jitter ist ein wichtiger Leistungsfaktor, anhand dessen Taktprodukte bewertet werden. Der LMK6P/D/H-BAW-Oszillator bietet eine hervorragende Jitter-Leistung, die **100 fs typisch** für Differenzgänge erfüllt:

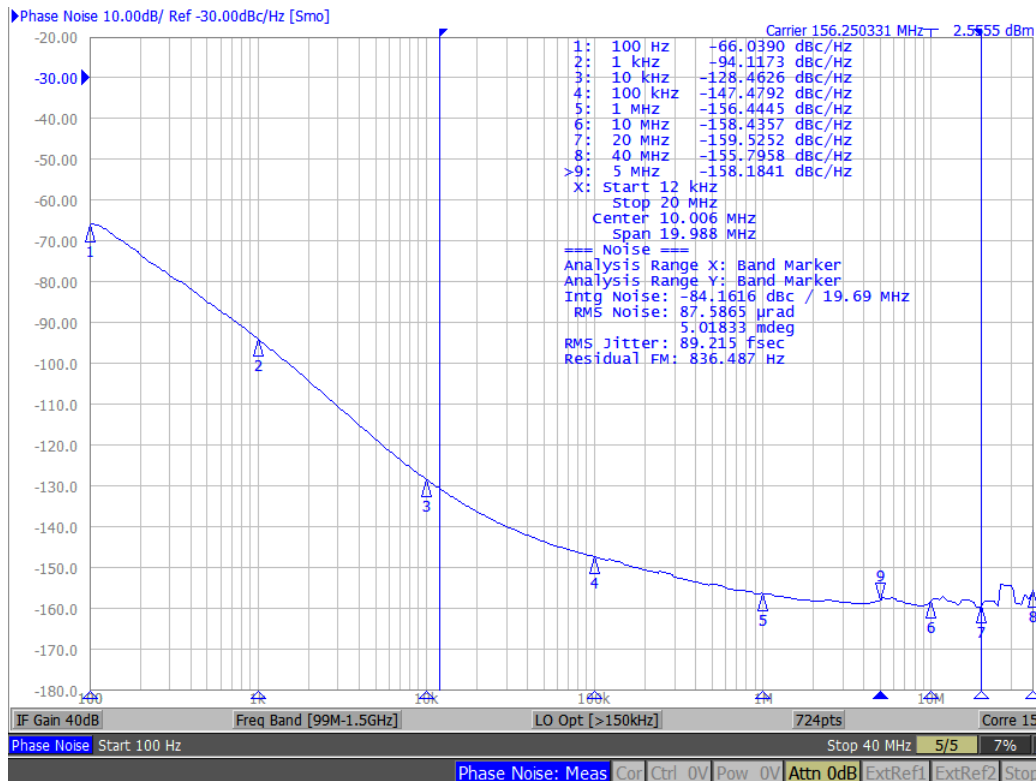


Abbildung 5-2. LMK6P/D/H BAW Oszillator Differenzphasenrauschleistung (normalisiert)

Die unsymmetrische Version bietet Best in Class Jitter-Leistung mit typischen Werten unter  $< 300$  fs:

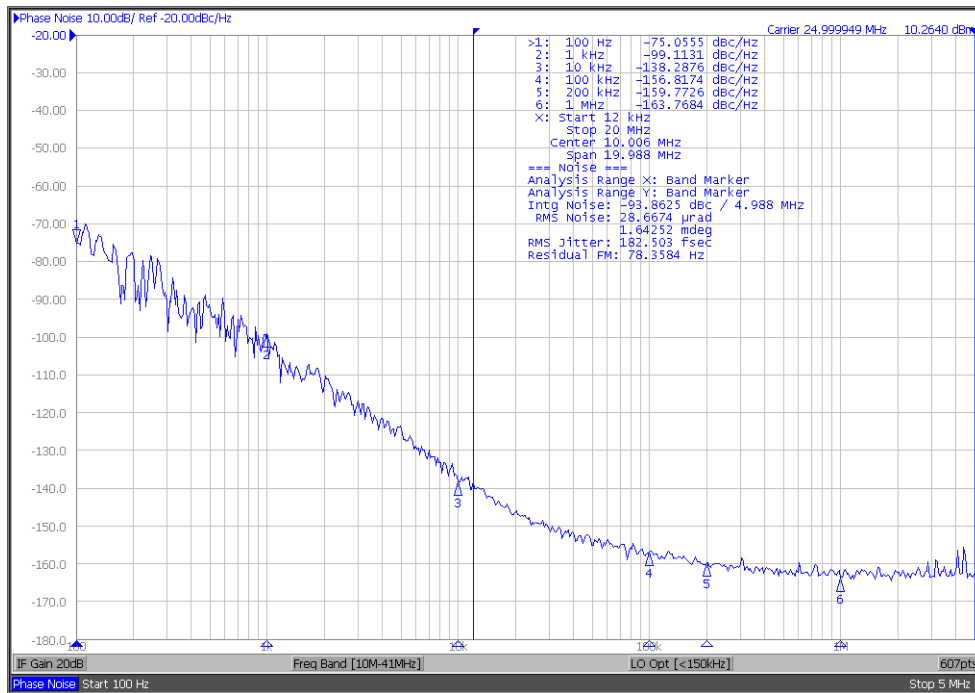


Abbildung 5-3. LMK6C BAW Oszillator, unsymmetrisch, Phasenrauschverhalten (normiert)

### 5.4 Rauschunempfindlichkeit Stromversorgung

Der LMK6C/D/P/H BAW-Oszillator integriert interne LDOs, die den Ausgangstakt inklusive Schutz vor Welligkeit der Stromversorgung bereitstellen. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass kein externer LDO oder DC/DC-Wandler an der Stromversorgung erforderlich ist, um die beste Leistung aus dem Oszillator herauszuholen. Mit einem einfachen Bypass-Kondensator am Versorgungspin wird ein Großteil der Welligkeit zurückgewiesen und verursacht kein Rauschen am Ausgang.



### 5.5 Mechanische Umdrehungen pro Minute

Bei Oszillatoren sind Vibrationen und Stöße häufige Ursachen für erhöhtes Phasenrauschen und Jitter, Frequenzverschiebung und Spitzen oder sogar physische Schäden am Resonator und seinem Gehäuse. Im Vergleich zu Quarzkristallen ist der LMK6C/D/P/H aufgrund der sehr viel geringeren Masse und der höheren Frequenz gegenüber Vibrationen und Stößen widerstandsfähiger – die durch die Beschleunigung auf das Gerät einwirkende Kraft ist aufgrund der geringeren Masse viel geringer. Der LMK6C/D/P/H BAW-Oszillator erfüllt sowohl MIL\_Std\_883F Method 2002, Bedingung A (Vibration) als auch MIL\_Std\_883F Method 2007 Bedingung B (Stöße), ohne Leistungseinbußen, (Jitter, Stabilität, allgemeine Geräteleistung) nach Vibration und Stößen.

Zusätzlich zu den militärischen Standardprüfungen wird der LMK6C/D/P/H BAW-Oszillator unter verschiedenen Bedingungen unter Belastungen geprüft. Der BAW-Oszillator verfügt nicht nur über minimale Frequenzverschiebung bei Stößen, während er unter Spannung steht, sondern kehrt auch nach Stößen wieder auf den ursprünglichen Level zurück.

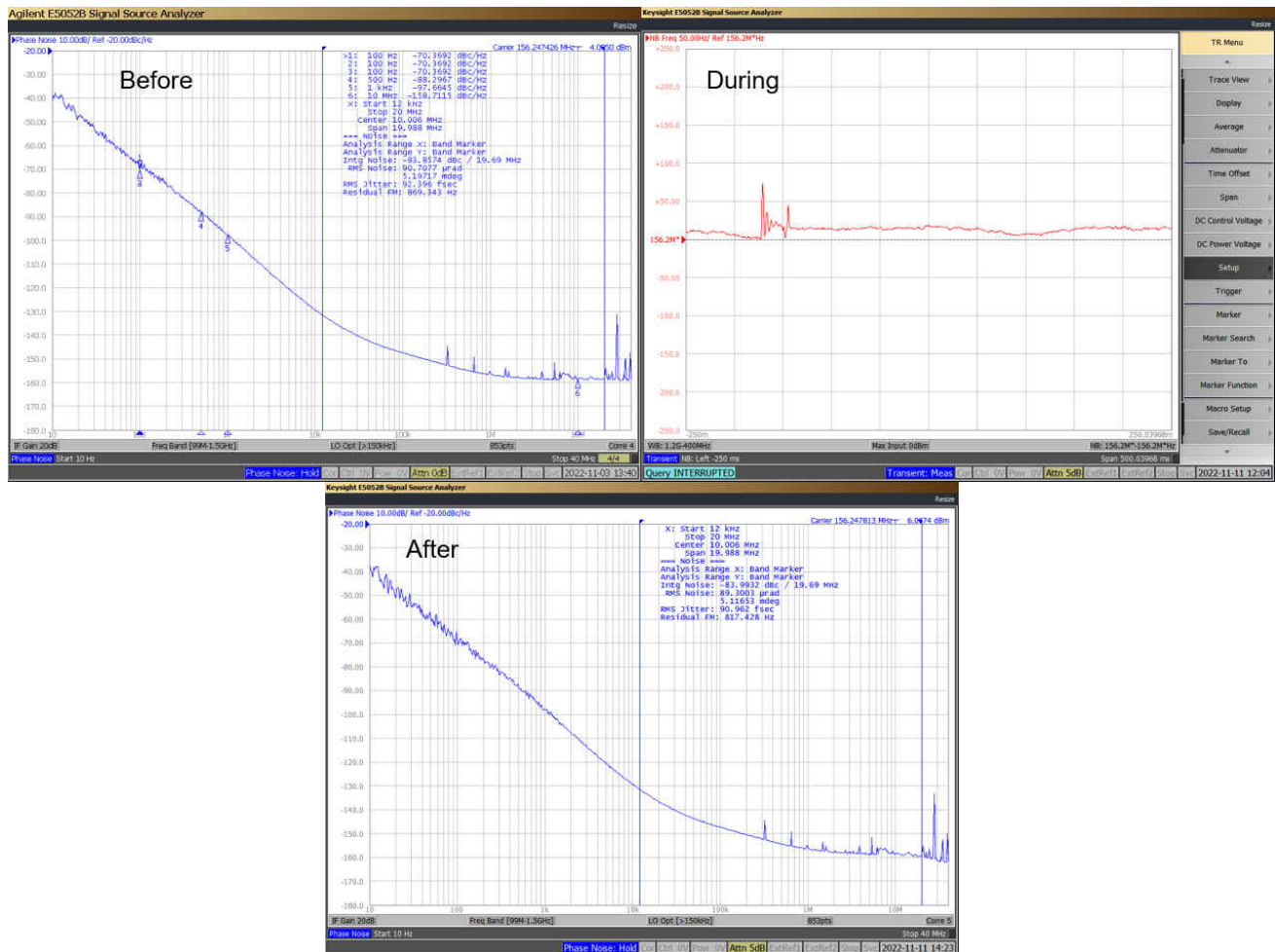


Abbildung 5-4. LMKD/P/H Stoßwirkung bei 1500 g



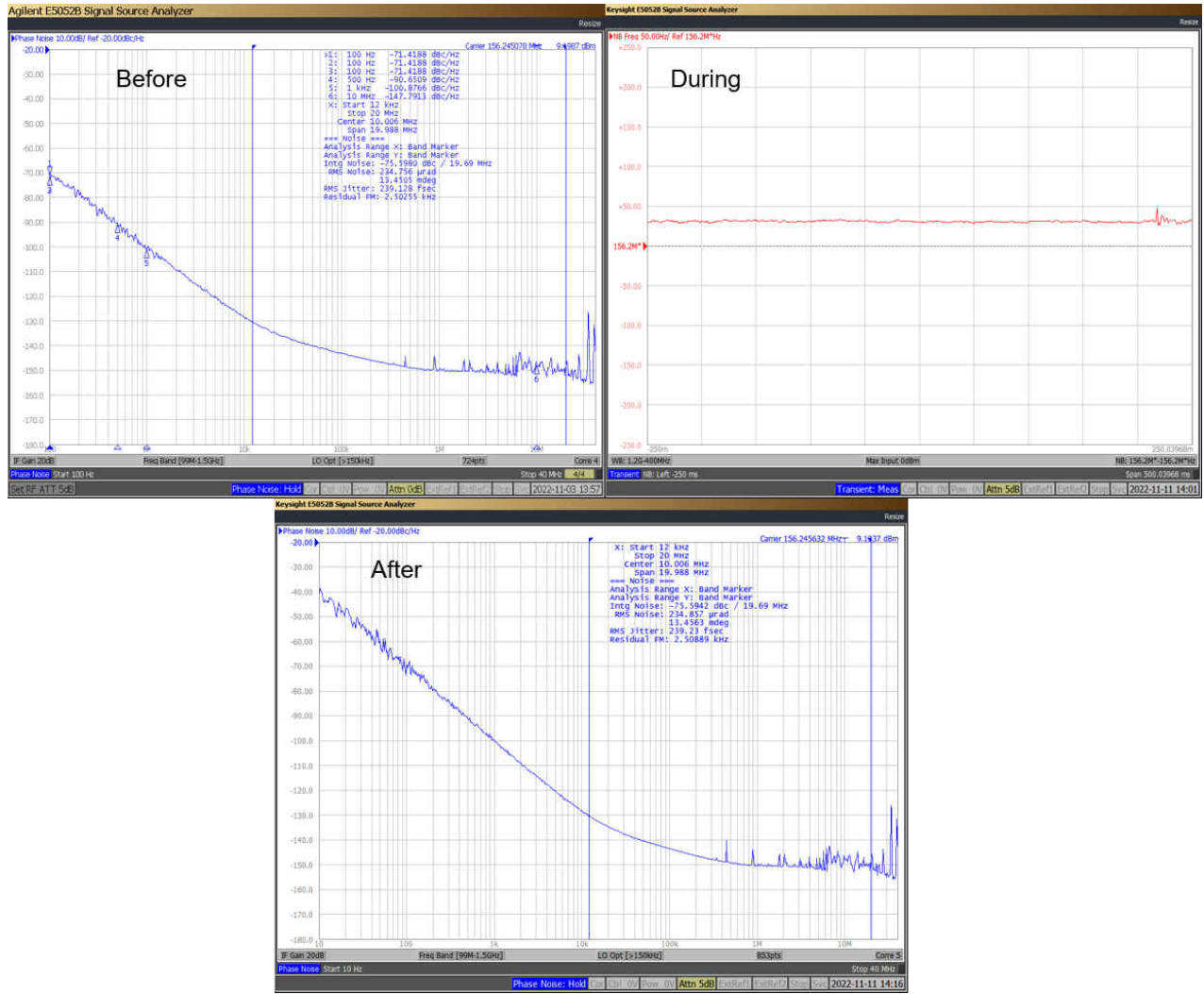


Abbildung 5-5. LMK6C Stoßwirkung bei 1500 g

Bei Vibrationen weist der BAW-Oszillator eine minimale Frequenzabweichung durch Vibration auf, die etwa 1 ppb/g beträgt. Dies entspricht einer Verbesserung, die in der Größenordnung von Quarzoszillatorlösungen liegt.

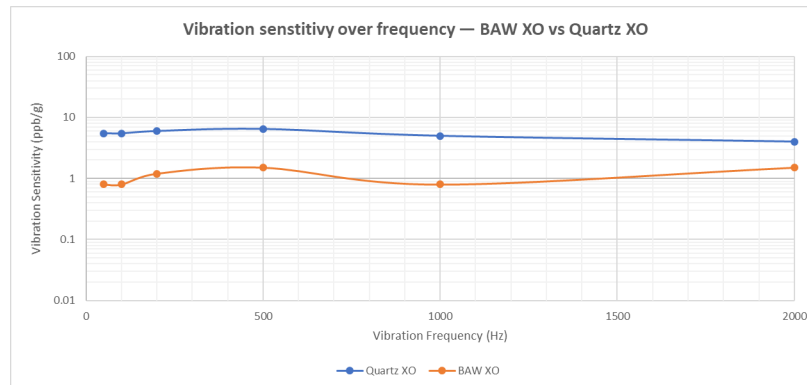


Abbildung 5-6. LMK6C/D/P/H BAW Oszillator vs. Quarzoszillator Vibrationsempfindlichkeit

Der LMK6C/D/P/H BAW-Oszillator garantiert eine  $\pm 25$  ppm-All-Inclusive-Frequenzstabilität mit einer Lebensdauer von 10 Jahren. [Abbildung 5-7](#) und [Abbildung 5-8](#) zeigen die Trends für die Lebensdauer für den LMK6P/D/H-Differenzial und den LMK6C unsymmetrischen BAW-Oszillator.

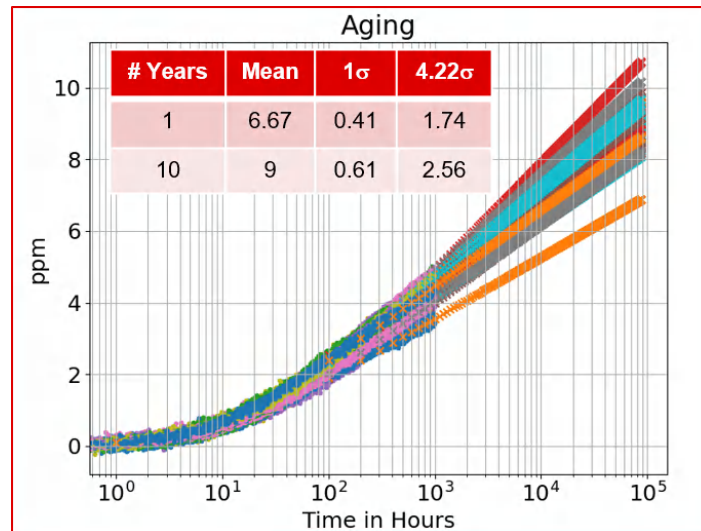


Abbildung 5-7. LMK6P/D/H Lebensdauer Differenzialmodell

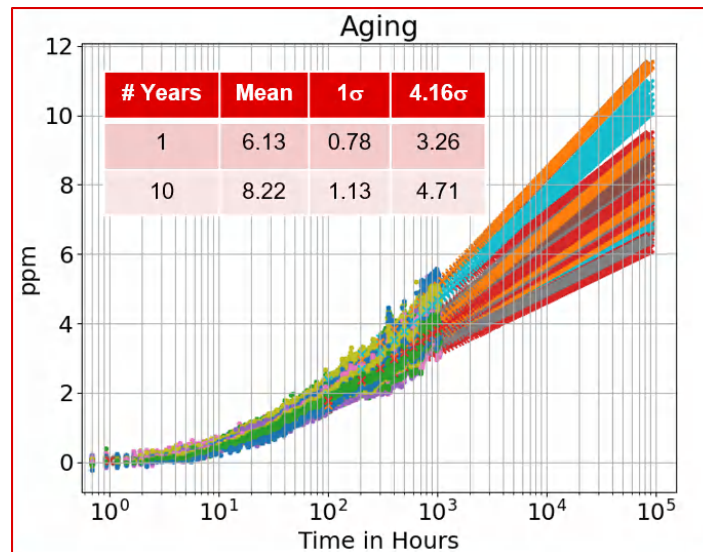


Abbildung 5-8. LMK6C Lebensdauer unsymmetrische Ausführung

## 6 Fazit

Der LMK6C/D/P/H BAW-Oszillator ist eine perfekte Alternative mit vielen Vorteilen gegenüber Quarzoszillatoren, mit vielen Leistungsvorteilen, wie in diesem Dokument erläutert. Außerdem unterliegt der BAW-Oszillator nicht den gleichen Lieferbeschränkungen wie Quarzkristall-Oszillatoren, da es sich um einen von TI vollständig gesteuerten und entwickelten Fertigungsprozess handelt, der große Materialmengen mit nur einem Wafer-Lauf produziert.

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated