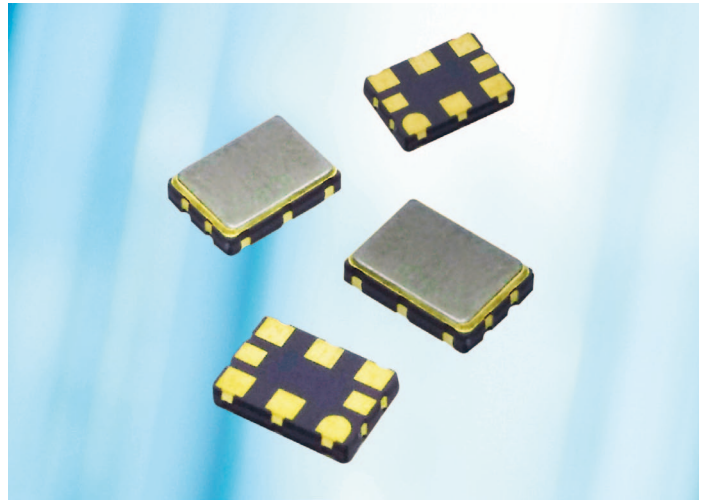
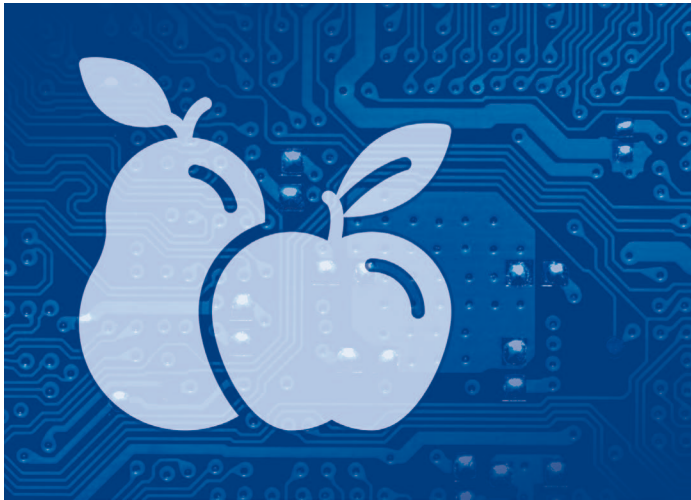


MEMS- und Quarz-Oszillatoren im Vergleich



Zwei unterschiedliche Funktionsprinzipien für die Taktung elektronischer Schaltungen buhlen um die Gunst ihres Einsatzes.

Wie Äpfel und Birnen lassen sich beide Technologien nicht direkt vergleichen. Aber es lässt sich die Eignung und Leistungsfähigkeit unter realen Bedingungen abschätzen.

Qual der Wahl?

Wenn es um die Auswahl eines geeigneten Oszillators geht, stehen die Anwender heute auch immer öfter vor der Frage: MEMS- (Micro-Electro-Mechanical System) oder quarzbasierter Oszillator? Welche Technologie ist die richtige für die jeweilige Anwendung?

Auf der Suche nach Antworten stößt man immer wieder auf Vergleiche, welche die MEMS-Alternativen, die erst seit Anfang der 2000er Jahre auf dem Markt erhältlich sind, klar im Vorteil sehen. Allerdings ist hier Vorsicht geboten, so erinnern die meisten, bei genauerer Betrachtung, doch eher an den Versuch, Äpfel mit Birnen zu vergleichen und oft ist das Ziel, dem bewährten und traditionellen Quarzoszillator Marktanteile abzunehmen.

Die MEMS-Technologie wurde in den letzten 25 Jahren von einigen Unternehmen entwickelt und weiter vorangetrieben, doch nach diversen Firmenübernahmen gibt es heute nur noch zwei echte Hersteller, wobei der Führende dieser beiden in etwa 1% des gesamten Timing-Marktes

Bild 1: Typische Quarzbasierte Oszillatoren im SMD-Gehäuse

ausmacht. Neben diesen beiden Unternehmen bieten viele Oszillatoren-Hersteller und auch Händler die MEMS-Oszillatoren der beiden Unternehmen sortimentsergänzend unter Eigenmarken an.

Was zu bedenken ist

Bei der Auswahl des richtigen Oszillators für ein elektronisches System müssen unter anderem folgende Aspekte bedacht werden:

- Systemleistung
- Systemtaktung
- Signalqualität
- Quelle des Referenzsignals

Dies sind die entscheidenden Eigenschaften, die über das Leistungsniveau und letztendlich auch die Qualität des Endproduktes entscheiden.

Um die scheinbare Überlegenheit MEMS-basierter gegenüber quarzbasierten Oszillatoren zu demonstrieren, vergleichen MEMS-Hersteller ihre Oszillatoren gerne mit einfachen Schwingquarzen. Hierzu muss man aber wissen, dass jede Oszillatorvariante, sei es quarz-, SAW-, oder MEMS-basiert, eine Komplettlösung darstellt, die im Vergleich erwiesenermaßen immer besser abschneiden wird als ein einfacher Schwingquarz. Ein Vergleich auf Augenhöhe ist das also nicht.



*Hendrik Nielsen
Inside Sales Specialist FCP
bei WDI
hnielsen@wdi.ag*

*David Meaney
VP Global Technical Sales
bei ECS*

*WDI AG
www.wdi.ag*

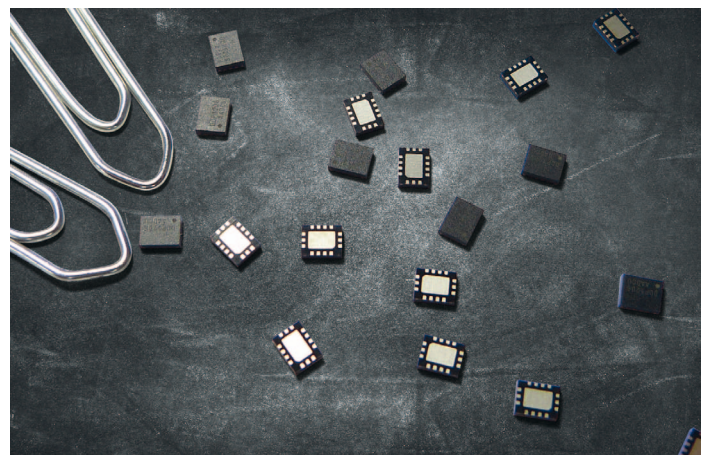


Bild 2: MEMS-basierte Oszillatoren im SMD-Gehäuse

Quarze und Oszillatoren

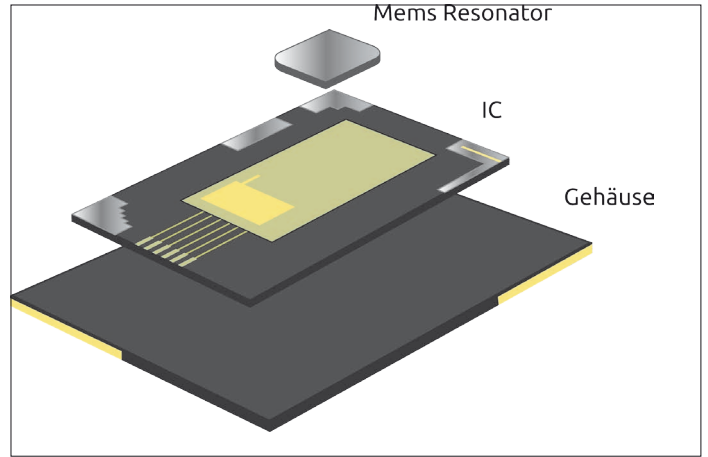
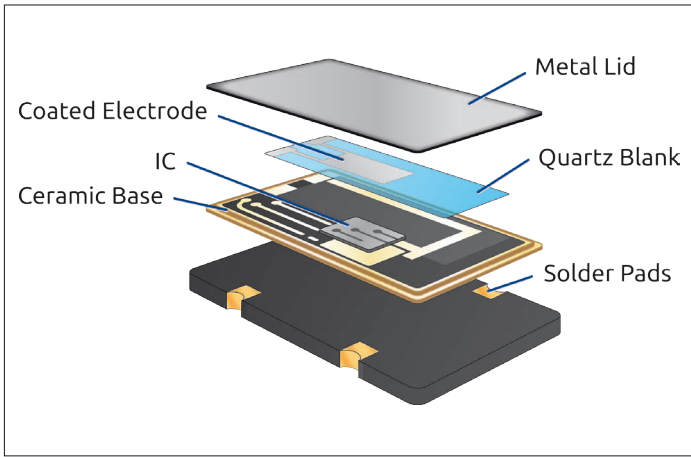


Bild 3: Typischer Aufbau eines quarzbasierten Oszillators

Bild 4: Typischer Aufbau eines MEMS-basierten Oszillators

Im Folgenden sind ein quarzbasierter Oszillator (Bild 1) und ein MEMS-Oszillator (Bild 2) im direkten Vergleich gegenübergestellt.

Aufbau und Merkmale

Ein Quarzoszillator nutzt einen Schwingquarz als Referenz und eine einfache Oszillatorschaltung

(Bild 3). Ein MEMS-Oszillator hingegen verwendet einen Siliziumresonator als Taktquelle und benötigt eine PLL-Schaltung zur Korrektur der Fertigungstoleranzen im Frequenzbereich und des Temperaturkoeffizienten (Bild 4).

Wie in Bild 5 zu erkennen ist, sind Quarzoszillatoren hochwertiger als MEMS-Oszillatoren.

Wie in Bild 5 zu erkennen ist, sind Quarzoszillatoren hochwertiger als MEMS-Oszillatoren.

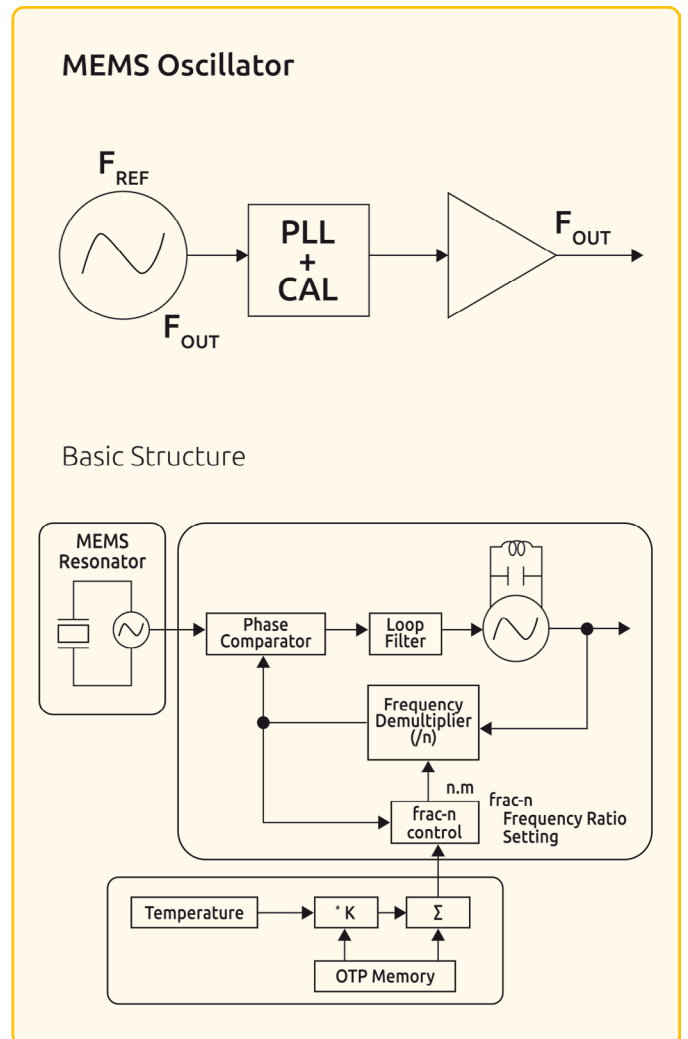
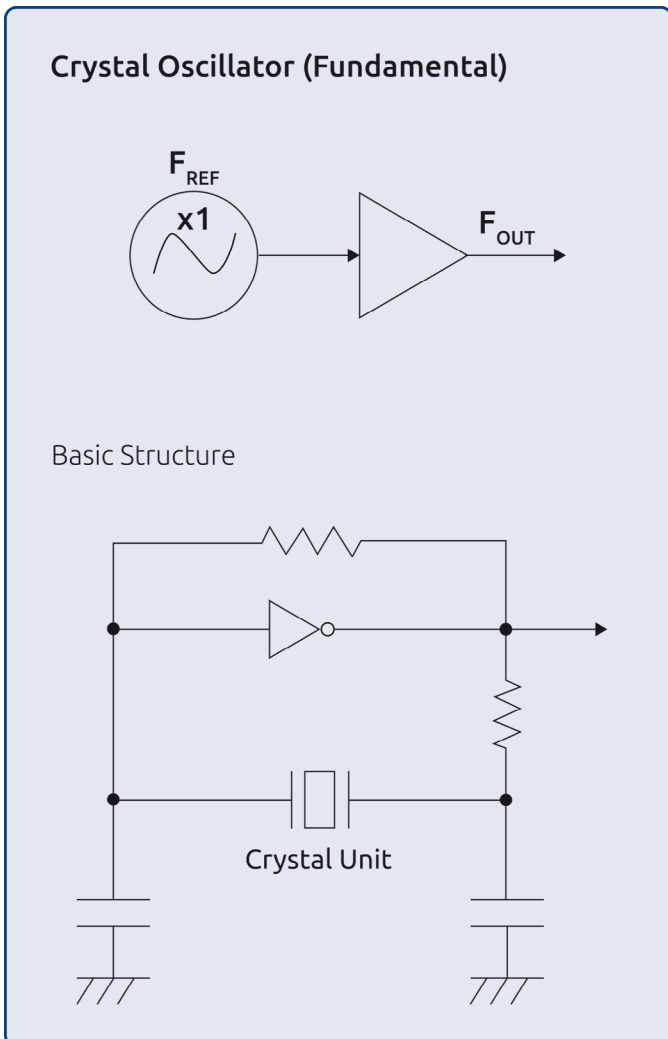


Bild 5: Funktionsprinzip der beiden Oszillatorschaltungen auf Quarz- und MEMS-Basis

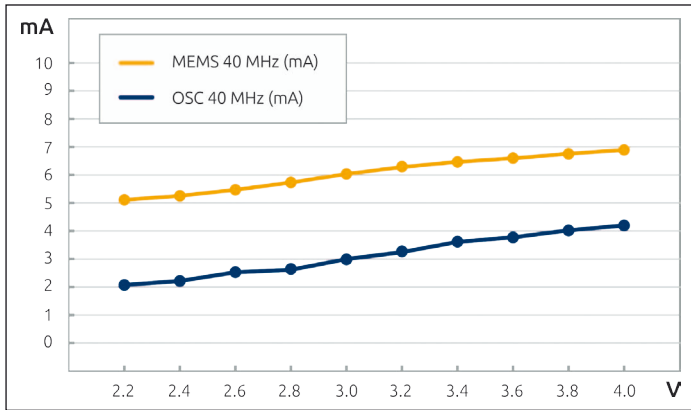


Bild 6: Vergleich der Stromaufnahme von MEMS- und Quarz-Oszillatoren bei 40 MHz

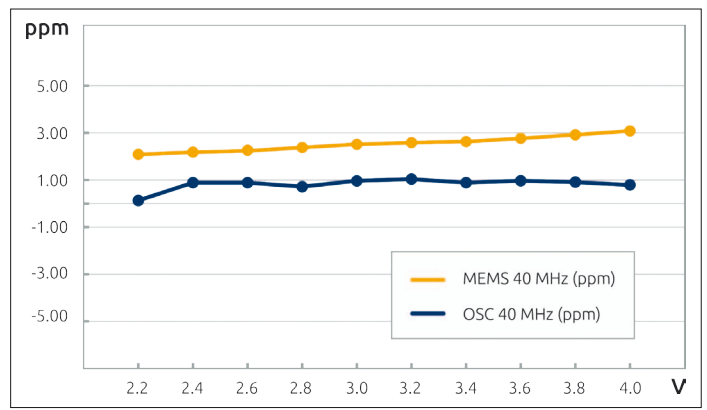


Bild 7: Vergleich der Start-Up-Charakteristik von MEMS- und Quarz-Oszillatoren bei 40 MHz

tige Taktreferenzen mit simpler Schaltung, wohingegen MEMS-Oszillatoren weitaus komplexer aufgebaut sind. Sie bestehen aus einem MEMS-Resonator, einer PLL zur Frequenzteilung und einem Temperaturkompensations-Netzwerk. Darüber hinaus ist eine werksseitige Kalibrierung zwingend erforderlich, um die korrekte Funktion zu gewährleisten.

Quarz- und MEMS-Oszillator im direkten Vergleich

Das US-amerikanische Unternehmen ECS International hat quarzbasierte Oszillatoren und MEMS-basierte Oszillatoren getestet und vermessen. Verglichen wurden dabei die Parameter, die für das Design von Kommunikations-, Netzwerk-, Industrie- und Konsumelektronik von entscheidender Bedeutung sind:

- 1) Leistungsaufnahme**
Wie viel Strom wird aufgenommen?
- 2) Start-Up-Verhalten des Oszillators**
Wie schnell startet der Oszillator nach dem Anlegen einer Spannung?
- 3) Jitter und Phasenrauschen**
Wie ist das Rauschverhalten, welches gerade bei Kommunikationsgeräten ein kritischer Faktor ist?
- 4) Frequenzstabilität**
Wie stabil ist die Frequenz bei konstant 25°C?
- 5) Frequenzverhalten über den Arbeitstemperaturbereich**
Wie stabil ist die Frequenz in Bezug auf Temperaturveränderungen?
- 6) Vibrationsempfindlichkeit**

Wie stabil ist die Frequenz unter rauen Bedingungen?

7) Zuverlässigkeit

Wann fällt der Taktgeber aus? Mean time between failure (= MTBF, mittlere Zeit zwischen den Ausfällen)

rend der Standard-Quarzoszillator nur auf etwa 3,16 mA kommt. Das bedeutet, dass ein MEMS in etwa doppelt so viel Strom benötigt, um auch nur vergleichbare Jitter- und Phasenrauschwerte zu erreichen wie der quarzbasierte Oszillator (Bild 6).

Zur Leistungsaufnahme

Quarzbasierte Oszillatoren nehmen grundsätzlich einen viel geringeren Strom auf, da sie den Vorteil einer Grund- oder Oberschwingung und einer einfachen Schaltungsstruktur haben. MEMS-basierte Oszillatoren benötigen im Gegensatz dazu mehr Strom, weil sie mehr Schaltungsaufwand betreiben und die PLL und der LCVCO die Gesamtstromaufnahme deutlich erhöhen. Infolgedessen liegt die Stromaufnahme des MEMS-Oszillators bei 6,09 mA, wäh-

Anlaufverhalten des Oszillators

Vergleicht man die Stabilität der Oszillatoren beim Einschalten, sieht man, dass der Quarzoszillator, sobald die Stromversorgung da ist, eine Genauigkeit von 1 ppm erreicht, während der MEMS-Oszillator darum kämpft, eine Genauigkeit von 2 ppm zu erreichen. Nach dem Einschalten ist der Quarzoszillator sofort stabil, wohingegen der MEMS-Oszillator während der Stabilisierungsphase der PLL und der LVCO Frequenzschwü- tterungen aufzeigt (Bild 7).

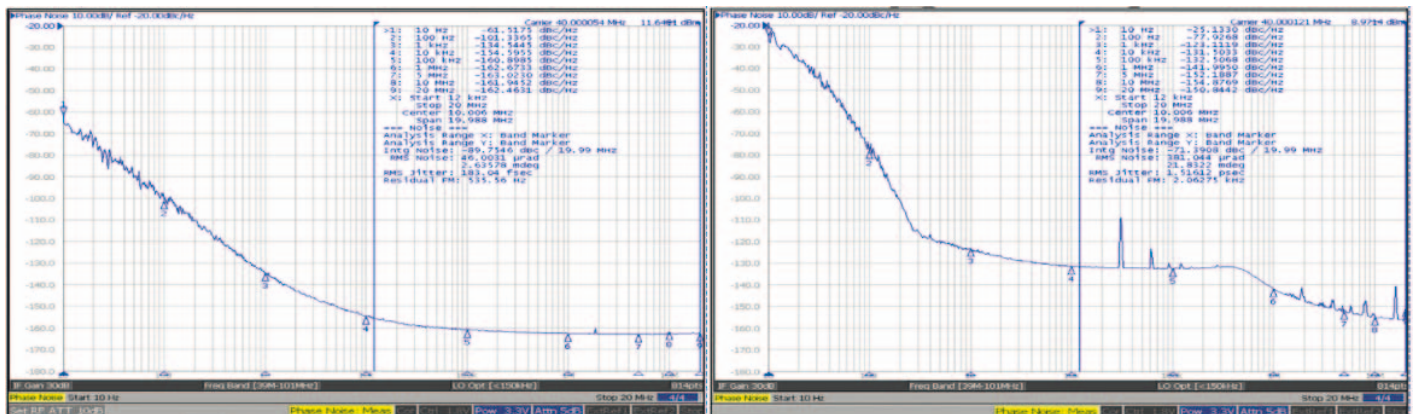


Bild 8. Gemessene Jitter- und Phasenrauschwerte von MEMS- (rechts) und Quarz-Oszillatoren (links)

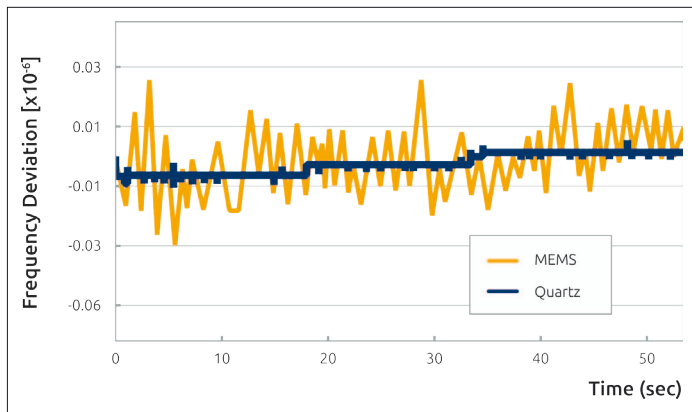


Bild 9: Vergleich der Frequenzstabilität von Quarz- und MEMS-Oszillator

Heutzutage ist ein schnelles Startverhalten wichtiger denn je. Ob es sich um Anwendungen im Konsumgüterbereich, in der Automatisierung oder um militärische Anwendungen handelt, die Taktgeber müssen stets betriebsbereit sein. Modernste elektronische Systeme, gerade im Bereich der „Wearables“ oder andere tragbare Geräte, müssen schnell aus- und eingeschaltet werden können, um die Lebensdauer der Batterie zu erhöhen oder ein System bei Bedarf schnell online zu bringen. Der Einsatz eines Oszillators mit schnellerem Start-Up-Verhalten, wie im Beispiel der Quarzoszillator, ermöglicht kürzere Aufwachzyklen und damit auch eine längere Lebensdauer der Batterie.

Jitter und Phasenrauschen

Hierfür werden Oszillatoren von der Stange zu vergleichbaren Preisen ausgewählt. Ein MEMS-basierter Oszillator und ein quarzbasierter Oszillator, welcher in vielen Anwendungen eingesetzt und in großen Stückzahlen gefertigt wird. Wenn man den Jitter des MEMS-Oszillators von 12 kHz bis 20 MHz betrachtet, lässt sich ein Jitter von 1,5 ps rms messen. Der Quarzoszillator hingegen erreicht über die SONET-Bandbreite von 12 kHz bis 20 MHz einen Jitter von 0,18 ps rms und schneidet damit nahezu achtmal besser als der MEMS-Oszillator ab.

Die Labormessungen zeigen auch, dass die Quarzoszillatoren ein viel besseres Phasenrauschenverhalten als die MEMS-Oszillatoren aufweisen. MEMS-Oszillatoren zeigen, gerade bei niedrigen Offsets, ein höheres Phasenrauschen, da der Silizium-Resonator im Vergleich zum Quarz eine schlechtere „Güte“ beziehungsweise einen schlechten Qualitätsfaktor aufweist. Bei 10 Hz beispielsweise weist der Quarzoszillator ein um 36 dB besseres Phasenrauschen als der MEMS-Oszillator auf (Tabelle 1). Das Phasenrauschen bei niedrigen Offsets ist gerade für die drahtlose Kommunikation sehr kritisch und kann auch Fehler in der optischen Kommunikation verursachen.

Die MEMS-Oszillatoren zeigen Frequenzspitzen, die durch den benötigten Frequenzteiler verursacht werden. Diese Spitzen treten im Frequenzband auf und verursachen deterministischen

Jitter (DJ), der die Bitfehlerleistung des Systems verschlechtert. Quarzoszillatoren mit Quarzen im Grundton weisen diese extremen Frequenzspitzen nicht auf (Bild 8).

Zur Frequenzstabilität

Die Frequenzstabilität der beiden Oszillatorvarianten ist in Bild 9 dargestellt. Sie wird bei 3,3 V und 25 °C für eine Dauer von 50 s gemessen. Deutlich erkennbar ist, dass der MEMS-Oszillator Frequenzsprünge in der Größenordnung von ± 600 ppb aufweist, was weit über die Standards der meisten Anwendungen in der drahtlosen Kommunikation hinausgeht. Der quarzbasierte Oszillator dagegen zeigt nur sehr wenige und geringe Frequenzsprünge und läuft deutlich stabiler in seiner Frequenz.

Frequenzverhalten über den Arbeitstemperaturbereich

Beim Vergleich des Frequenzverhaltens über den Arbeitstemperaturbereich von Quarz- und MEMS-Oszillator zeigt sich, dass der quarzbasierte Oszillator der typischen, kontinuierlich kubischen Kurve eines AT-Kristalls folgt (Bild 10a). Damit erreicht er eine Frequenzstabilität von ± 25 ppm über den Arbeitstemperaturbereich von -40°C bis $+85^{\circ}\text{C}$, was für die meisten Anwendungsbereiche vollkommen ausreichend ist.

Auf den ersten Blick scheint der MEMS-Oszillator ein besseres

Frequenzverhalten über denselben Temperaturbereich zu haben (Bild 10b). Bei genauerem Hinschauen lassen sich aber Frequenzsprünge erkennen, die entstehen, wenn die PLL das Teilungsverhältnis anpasst, um Temperaturveränderungen auszugleichen. Notwendig ist dies, um die beträchtliche Frequenzdrift von bis zu 30 ppm/K, oder 3750 ppm über -40 bis $+85^{\circ}\text{C}$, zu kompensieren.

Der quarzbasierte Oszillator ist über den Arbeitstemperaturbereich viel stabiler in seiner Frequenz und bietet eine hervorragende Güte. Anders als der MEMS-basierte Oszillator, müssen bei den herkömmlichen Quarzoszillatoren die Temperaturveränderungen nicht ausgeglichen werden, um eine Stabilität von nur ± 10 ppm über den erforderlichen Arbeitstemperaturbereich aufrechterhalten zu können. Sollte eine bessere Stabilität erforderlich sein, können Quarzoszillatoren mit einer Temperaturkompensation ausgestattet werden, wodurch eine Stabilität von nur 0,5 ppm über den Arbeitstemperaturbereich erreicht wird.

Zur Vibrationsempfindlichkeit

Die MEMS-Technologie verspricht herausragende Eigenschaften, was die Vibrationsempfindlichkeit der MEMS-basierten Oszillatoren angeht. Doch schaut man sich die Daten genauer an, so ist das mehr Schein als Sein. Der typische Messbereich ist mit weniger als einer Schwingung

Offset	Quarz	MEMS	Quarz "Q"	Rauschleistung
10 Hz	-61,5175	-25,133	36 dB	dBc/Hz
100 Hz	-101,3365	-77,9268	23 dB	dBc/Hz
1 kHz	-134,5445	-123,1119	11 dB	dBc/Hz
10 kHz	-154,5955	-131,5033	23 dB	dBc/Hz
100 kHz	-160,8985	-132,5086	28 dB	dBc/Hz
1 MHz	-162,6733	-141,995	21 dB	dBc/Hz
5 MHz	-163,0239	-152,1887	11 dB	dBc/Hz
10 MHz	-161,9452	-154,8769	7 dB	dBc/Hz
20 MHz	-162,4631	-150,8442	12 dB	dBc/Hz

Tabelle 1: Phasenrauschen von Quarzoszillatoren im Vergleich zu MEMS

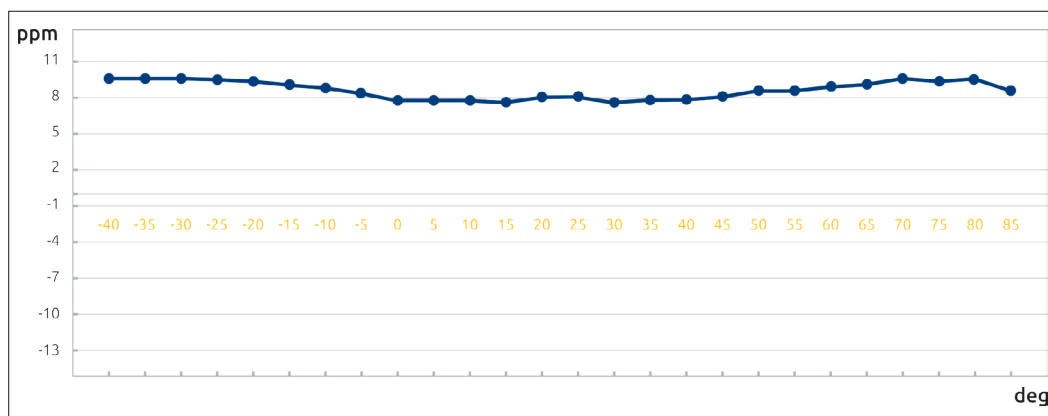
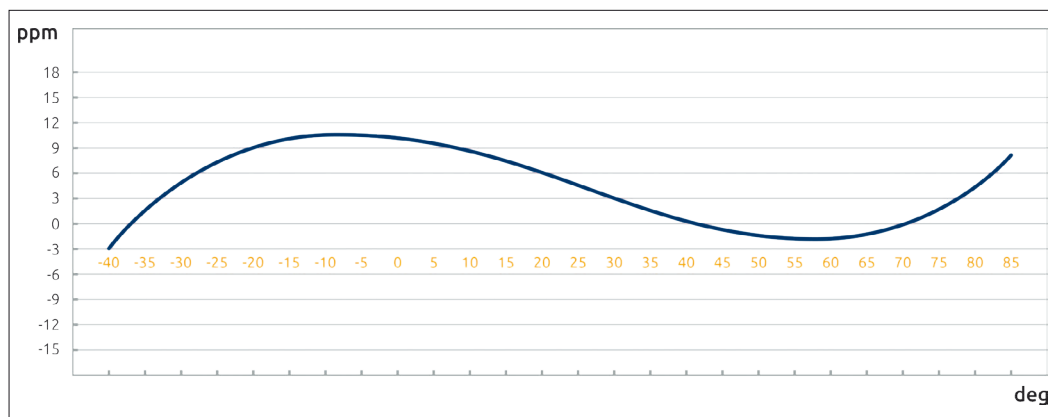


Bild 10. Frequenzstabilität über den Arbeitstemperaturbereich bei 40 MHz, a) Quarzoszillator, b) MEMS-Oszillator

bis zu 2 kHz spezifiziert. Oberhalb von 2 kHz ist die Vibrationsdichte signifikant geringer. Im vorliegenden Test wird der Phasenjitter im Bereich von 12 kHz bis 20 MHz gemessen, was deutlich über dem liegt, was jeder Anwender spezifizieren würde. Mit verfeinerten Quarzgeometrien, höherfrequenten Quarzrohlingen (sogenannten Blanks) und einer kontinuierlichen Verbesserung des Herstellungsprozess haben die Quarzhersteller die Vibrationsempfindlichkeit ihrer Resonatoren im Laufe der Zeit erheblich verbessern können.

Die Vibrationsempfindlichkeit wird in Teilen pro Milliarde pro g Schwingung (parts per billion/g = ppb/g) angegeben. Die Vibrationsempfindlichkeit von MEMS-Oszillatoren reicht von 0,01 ppb/g bis 1 ppb/g. Die Quarzoszillatoren erreichen 0,1 ppb/g bis 1 ppb/g, was für fast alle Anwendungen immer noch mehr als ausreichend ist.

Zuverlässigkeit (MTBF)

Die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen (mean time between failure = MTBF) wird bei MEMS-Oszillatoren mit 130.000 Jahren angegeben, während beim Quarzoszillator 30.000 Jahre angegeben werden. Oberflächlich betrachtet scheinen 100.000 Jahre ein wichtiger Diskussionspunkt zu sein. Doch muss bedacht werden, dass die meisten Produkte für einen Lebenszyklus von weniger als fünf Jahren entwickelt werden. Langlebige Designs müssen vielleicht auch zehn bis zwanzig Jahre funktionsfähig bleiben. Wenn man Vergleichswerte von Pha-

senrauschen, Jitter und Stabilität beachtet, gibt man viel auf, nur damit das Produkt theoretisch 130.000 Jahre lange funktioniert.

Den Menschen gibt es zwar schon seit ca. 200.000 Jahren, die Zivilisation jedoch erst seit ca. 6000 Jahren. Ein Produktlebenszyklus von „nur“ 30.000 Jahre sollte also für jegliche Art von Anwendungsgebiet völlig ausreichend sein.

Fazit: Neuer ist nicht gleich besser

Die Übersicht der vorangegangenen Tests in Tabelle 2 zeigt deutlich, dass quarzba-

sierte Oszillatoren ein besseres Leistungsspektrum bieten als die MEMS-basierten Alternativen. Gerade wenn man die kritischsten Parameter betrachtet: Leistung, Anlaufverhalten, Phasenrauschen und -jitter, Frequenzstabilität und Frequenzverhalten über den Arbeitstemperaturbereich sowie Vibrationsempfindlichkeit und Zuverlässigkeit.

Quarzoszillatoren bieten eine bewährte Technologie, Gehäuse nach bekannten Industriestandards und minimieren das Designtisiko für alle elektronischen Systeme von Verbraucher- und Industrieanwendungen bis hin zu anspruchsvollsten Netzwerk- anwendungen. Sie weisen eine geringere Stromaufnahme und eine schnellere Anlaufzeit auf, wodurch die Batteriebensdauer tragbarer Geräte verlängert wird. Durch die überlegenen Jitter- und Phasenrauschwerte eignen quarzbasierte Oszillatoren sich ideal für drahtlose und drahtgebundene Hochgeschwindigkeits-Netzwerk- anwendungen sowie Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsanwendungen. Zudem bieten sie eine hohe Frequenzstabilität über den gesamten Arbeitstemperaturbereich und zeigen nicht die bei MEMS-Oszillatoren üblichen Frequenzsprünge.

Abschließend kann also festgehalten werden, dass MEMS-Oszillatoren keine signifikanten Vorteile gegenüber den herkömmlichen, stabileren Quarzoszillatoren bieten. Ganz im Gegenteil: Verbaut sind sie oft in ein herstellerepezifisches Gehäuse, was sie zu einer sogenannten Single-Source-Komponente macht. Ist der MEMS-Oszillator erst einmal „ein-designt“ worden, kann er nur noch aus der Fertigung eines einzigen Herstellers bezogen werden. ◀

Parameter	Quarzoszillator	MEMS-Oszillator
Phasenjitter	0,18 ps	1,5 ps
Stromaufnahme	3,16 mA	6,09 mA
Anlaufzeit	1,5 ms	200 ms
Frequenzstabilität	5 ppm/K oder 25 ppm -40...+85 °C	30 ppm/KC oder 3750 ppm -40...+85 °C
Frequenzverhalten	stabil	Frequenzsprünge

Tabelle 2: Quantitative Vergleichsergebnisse