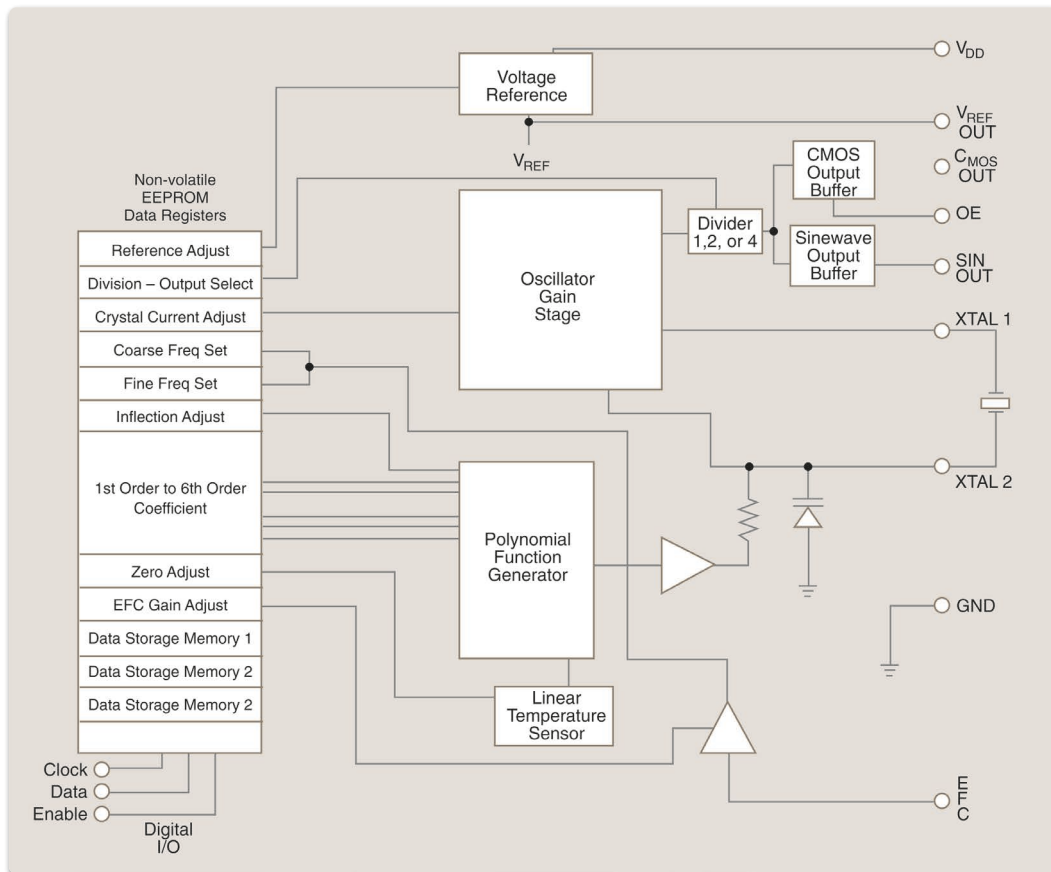


## Design und Performance von Präzisions-Miniatur-TCXOs

Nach einem kurzen Rückblick auf die Geschichte der Oszillator-Temperaturkompensation wird der aktuelle Stand der Technik der TCXO-Technologie beschrieben.



von Varaktordioden zusammen mit Verbesserungen bei Thermistoren mit negativem TK ermöglichten es, die Quarze mit größerer Genauigkeit zu kompensieren. Bereits 1961 wurden Kompensationsverhältnisse von mehr als 100 erreicht. Heute sind Verhältnisse von zwei Größenordnungen ungefähr die Grenze für eine Thermistor/Widerstands-Kompensation. Aber auch heute noch erfordert das Erreichen von Stabilitäten von mehr als 0,5 ppm mehrere Temperaturläufe und wiederholte Netzwerkanpassungen mit mindestens drei Thermistoren.

### Digitale Temperaturkompensation

In den späten 70er Jahren ermöglichten Fortschritte in der Technologie der integrierten Schaltkreise Kompensationsysteme mit Analog/Digital-Wandlern und Festkörperspeichern. TCXOs mit 0,1 ppm wurden entwickelt, viele mit integrierter Rechenleistung zur Erleichterung der Kalibrierung und des Systembetriebs.

### Analoge Integration

Da die Großintegration immer weiter ausgebaut wurde, konnte

Als die ersten Quarzoszillatoren in den 20er Jahren gebaut wurden, wiesen die einzigen verfügbaren Quarze, wie der mit X-Cut, ein schlechtes Temperaturverhalten auf. Die Entwicklung des AT-Cut-Quarzes war ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Temperaturkompensation. Er ermöglichte eine relativ flache Frequenz-Temperatur-Kurve, zentriert auf 25 °C (Bild 1). Bis Mitte der 40er Jahre waren die Alterungs- und Temperatureigenschaften von Quarzen nicht gut genug, um Präzisionskorrekturen praktikabel zu machen. Aus verschiedenen Gründen kam es zu Aktivitätseinbrüchen und gekoppelten Moden und somit zu erheblichen Frequenzstörungen, die die Wirksamkeit jeglicher Kompensationsversuche einschränkten. Doch Fortschritte

bei der Konstruktion von Quarzplatten und Kristallgehäusen wie den Kaltschweißhaltern ermöglichten die Herstellung von Kristallen mit relativ glatten Frequenz-Temperatur-Kurven und Alterungsraten von nur  $10^{-9}$  pro Tag bzw.  $10^{-3}$  ppm.

### Thermistor/Widerstands-Netzwerk-Kompensation

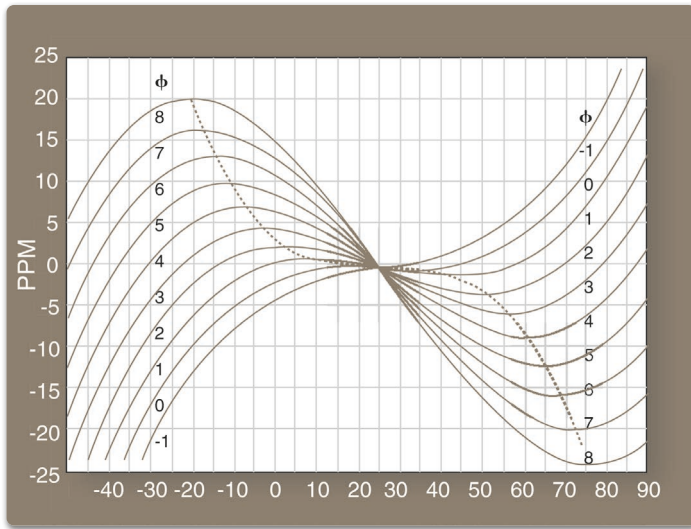
Thermistor/Widerstands-TCXOs sind seit 50 Jahren die Hauptstütze der Temperaturkompensation von Quarzoszillatoren. Eine Korrekturspannung, die per Netzwerk aus einem oder mehreren Thermistoren/Widerständen erzeugt wird, gleicht die Frequenzschwankungen eines spannungsgesteuerten Quarzoszillators gegenüber der Temperatur aus. Die Einführung

### Der Autor:

Steve Fry ist Leiter der Entwicklungstechnik bei Greenray Industries, Inc. in Mechanicsburg, Absolvent des Ohio Institute of Technology und seit mehr als 25 Jahren in der Konstruktion und Entwicklung von Frequenzsteuerungsgeräten tätig. Neben verschiedenen Veröffentlichungen hält Fry zehn U.S.-Patente. Sie können ihn unter [sfry@greenrayindustries.com](mailto:sfry@greenrayindustries.com) erreichen.

Quelle:  
*The Design and Performance of Precision Miniature TCXOs*  
Greenray Industries, Inc.,  
[www.greenrayindustries.com](http://www.greenrayindustries.com)

übersetzt und leicht gekürzt  
von FS



**Bild 1: Charakteristische Temperaturkurven für die normierte Grundfrequenz des AT-Cut-Quarzes**

man mehr der für die Temperaturkompensation erforderlichen Funktionen in einem einzigen IC unterbringen. Dies hat zu der aktuellen Generation von ASICs, die analoge Präzisions-TCXOs mit nur zwei Komponenten (ASIC und Quarz) geführt.

Die neuesten Bauelemente für TCXO-Anwendungen sind komplexe, großformatige ICs, die analoge Präzisionsfunktionen, nichtflüchtige digitale Speicher, Varaktordioden und HF-Oszillatorschaltung vereinen. Nachdem die ersten Bauelemente noch relativ groß waren, konnten durch die Reduzierung der Geometrien kleinere ICs hergestellt werden, die es ermöglichen, einen kompletten Präzisions-

TCXO in einem Gehäuse von nur 3,2 x 5 mm unterzubringen. Das Aufmacherbild zeigt, was in so einem Schnipsel alles drinstecken kann.

### Polynom-Funktionsgenerator

Das Herzstück eines solchen ASICs ist der Polynom-Funktionsgenerator. Ziel ist es, eine temperaturabhängige Spannung zu erzeugen, die der VCXO-Spannung entspricht, die erforderlich ist, um die Oszillatorfrequenz über den gesamten Temperaturbereich exakt auf dem Nennwert zu halten. Mit einem linearen Temperatursensor und einer Reihe von analogen Multiplikationen werden die Koeffizienten eines Polynoms hoher Ordnung simuliert.

Obwohl der ideale AT-Quarz einer Kurve dritter Ordnung folgen sollte, erfordern Nichtlinearitäten in der Schaltung und im Quarz, dass Terme höherer Ordnung einbezogen werden, um eine optimale Übereinstimmung mit der erforderlichen Kompensationsspannungskurve zu erzielen. Die Beugungstemperatur des Quarzes, wichtig für die Anpassung der Kurve, ist eine der Variablen, die programmierbar sein müssen, um eine breitere Palette von Quarzen verwenden zu können. Einige Miniatur-Streifenquarze können Beugungstemperaturen von bis zu 40 °C aufweisen, was eine genaue Kurvenanpassung schwierig machen kann.

### Integrierte Oszillatorfunktionen

Neben dem Funktionsgenerator sind auf den neuesten Chips auch alle anderen Oszillatorfunktionen integriert. Ein präziser Low-Dropout-Spannungsregler versorgt die gesamte Schaltung. Aufgrund der erforderlichen stabilen Spannungen zur Erreichung der Frequenzstabilität ist eine präzise Referenzspannungsquelle unerlässlich. Der Betrieb ist bereits ab 2,7 V möglich.

Die Schaltung zur Ansteuerung des Quarzoszillators auf dem Chip verfügt über einen programmierbaren Quarzansteuerungsstrom für einen weiten Bereich von Quarzimpedanzen und -frequenzen. Die spannungsvariablen Kondensatoren, mit

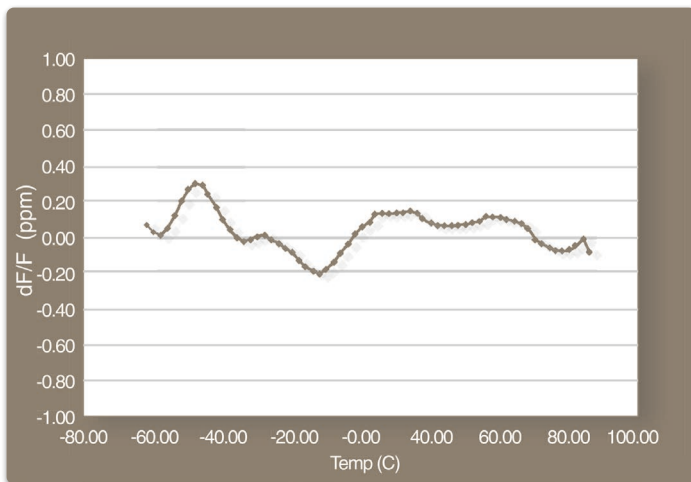
denen die Oszillatorfrequenz eingestellt wird, sind in der Regel als MOS-Struktur anstelle einer herkömmlichen dotierten Sperrschichtdiode implementiert. Eine relativ hohe Abstimmempfindlichkeit ist aufgrund des Niederspannungsbetriebs der Bauelemente erforderlich und kann über 50 ppm/V liegen.

Die Ausgangskonditionierungsschaltung puffert den Quarzoszillator und sorgt für die richtigen Ausgangspegel. Die meisten ASICs können entweder eine CMOS-Rechteckwelle oder eine abgeschnittene 1-V<sub>pk-pk</sub>-Sinuswelle mit geringerer Leistung liefern.

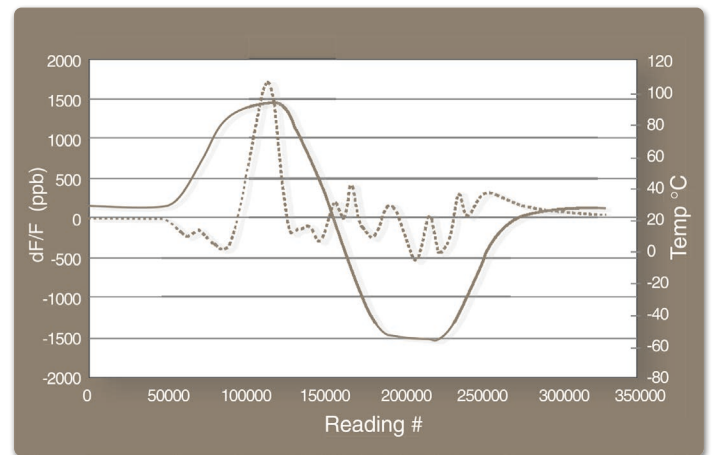
Eine elektronische Frequenzsteuerung zur Implementierung einer VCXO-Funktion ist verfügbar. Ein paar Bytes nicht zweckgebundenen Benutzerspeichers sind nützlich für die Speicherung von Seriennummern und anderen Charakterisierungsdaten zur verbesserten Automatisierung.

### Präzisions-AT-Quarze

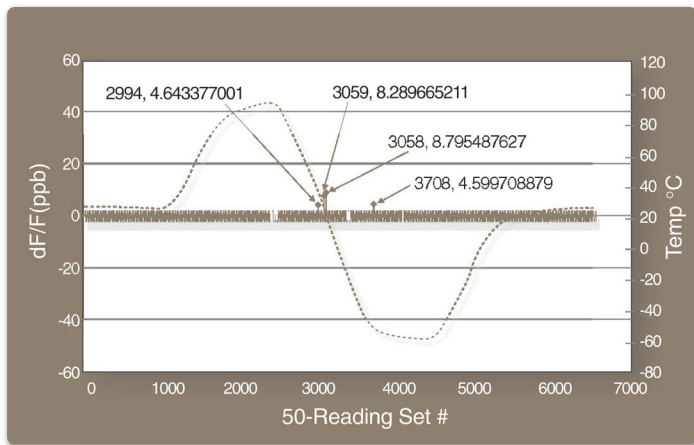
Immer noch ist es unmöglich, einen Präzisions-TCXO ohne einen hochwertigen Quarz herzustellen. Zwar werden gute Quarze immer noch als runde Rohlinge in konventionellen zweipoligen geschweißten Gehäusen hergestellt, doch ihre Größe schließt ihre Verwendung in vielen Miniatur-Oszillator-Designs aus. Dies hat zur Entwicklung von AT-Streifenquar-



**Bild 2: Erreichbare Frequenz-Temperatur-Leistung**



**Bild 3: Frequenzänderung eines 20-MHz-Oszillator während eines Temperaturschwankungslaufs, s. Text**



**Bild 4: Screening-Ergebnisse eines 20-MHz-TCXOs, s. Text**

zen mit ausgezeichneter Leistung bei kleinen Formfaktoren geführt. Obwohl die Bewegungskapazität geringer ist, gelingt es, eine ausreichende Abstimmungsempfindlichkeit für die Kompensation zu erreichen. Mit einem geeigneten Blank-Design, Packaging und sorgfältiger Verarbeitung kann eine Leistung erreicht werden, die der von herkömmlichen runden Quarzen mindestens entspricht. Etwa liegen die Alterungsraten beim Bruchteil eines ppm pro Jahr.

## Kalibrierungs- und Kompensationsverfahren

Aufgrund der Beschaffenheit der Quarz-Oszillator-Kombination ist es erforderlich, jeden Oszillator einzeln zu messen und zu kalibrieren, wenn Sub-ppm-Pegel angestrebt werden. Obwohl die meisten TCXOs in einer Charge ähnlich sind, sind keine zwei gleich, wenn man versucht, die Kurven auf weniger als 1 ppm abzustimmen. Es ist wichtig, jede Einheit aktiv über den interessierenden Temperaturbereich zu charakterisieren, um die anfänglichen Koeffizientenparameter zu berechnen. Es folgt ein Anforderungslauf, bei dem jeder Oszillator über den gewünschten Temperaturbereich betrieben wird, wobei man die VCXO-Steuerspannung bestimmt, die erforderlich ist, um die Nennfrequenz zu halten. Diese Daten werden dann in einen Algorithmus zur Kurvenanpassung eingegeben, der die Polynomkoeffizienten

berechnet, die die beste Übereinstimmung ergeben. Diese Werte werden in den ASIC geladen und dann erfolgt ein weiterer Temperaturtest, um festzustellen, ob die Frequenzdrift innerhalb der Spezifikationsgrenzen liegt. Je nach Spezifikation kann beim ersten Durchlauf eine gewisse Ausbeute erzielt werden, aber in den meisten Fällen muss erneut überprüft werden.

Mit programmierbaren ASICs können automatisierte Testsysteme all dies ohne Eingriff des Bedieners ausführen.

## Statische Frequenz in Abhängigkeit von der Temperatur

Die erreichbare Frequenz in Abhängigkeit von der Temperatur ist eine Funktion davon, wie gut die Spannung, die vom Polynomgenerator erzeugt wird, mit der erforderlichen Spannung des VCXOs übereinstimmt. Viele Variablen beeinflussen diese Fähigkeit, darunter die Abstimmlinearität des VCXOs, die Qualität des Quarzes (wie genau er der idealen AT-Kurve folgt), der Temperaturkoeffizient der anderen Oszillatorkomponenten, die Beugungstemperatur des Quarzes und die Stabilität der Spannungsreferenz. Bild 2 zeigt die erreichbare Frequenz-Temperatur-Leistung.

## Temperaturrampenprüfung

Die Frequenzausschläge, die bei wechselnden Temperaturbedingungen auftreten, variieren je

nach Richtung und Geschwindigkeit der Temperaturänderung. Ein wichtiges Merkmal ist die enge thermische Kopplung zwischen dem Kristall und dem Temperatursensor des ASICs. Dieser thermische Pfad ist bei einem Miniaturgehäuse von Natur aus kurz, da der Quarz und der ASIC räumlich nahe beieinander liegen. Aus diesem Grund werden die meisten kleinen TCXOs gut funktionieren. Bild 3 zeigt das Verhalten eines 20-MHz-Oszillators während eines Temperaturschwankungslaufs. Die rote Kurve zeigt die Kammertemperatur auf der rechten y-Achse und die blaue Kurve die Oszillatorfrequenz auf der linken y-Achse. Die x-Achse zeigt die Zeit normiert auf die Ablesezahl (jede Ablesung dauert 20 ms). Beginnend bei 25 °C wird die Kammer in einer Rampe auf 90 °C mit einer Rate von 8 K/min gebracht. Nach der Stabilisierung wird sie mit der gleichen Geschwindigkeit auf -60 °C heruntergefahren. Mit Ausnahme der Spitze am „heißen“ Ende, wo die Temperatur den kompensierten Bereich überschritt, ist zu erkennen, dass die Auswirkungen der Rampe minimal sind und dass die Hysterese gering ist, wenn die Rampe in entgegengesetzter Richtung verläuft.

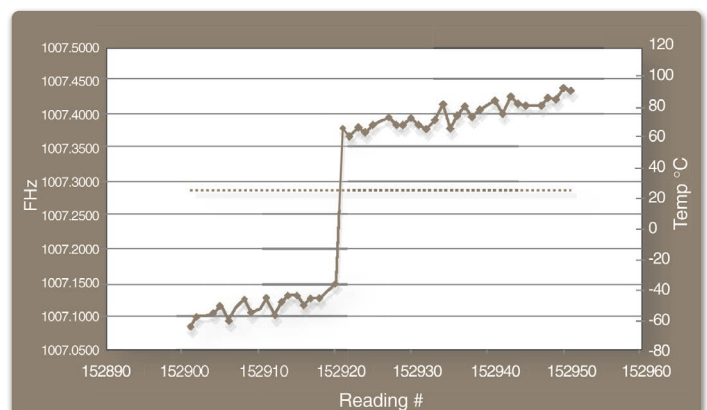
## Modenstörungen und Mikrosprünge

TCXO-Kristalle sind seit jeher mit Anomalien in ihrem Temperaturverhalten behaftet, die durch Blank-Design oder Unzulänglichkeiten bei der Verarbeitung

und Herstellung des Kristalls hervorgerufen werden. Eine mangelhafte Blank-Geometrie kann zu einer Kopplung verschiedener Schwingungsmoden führen. Das kann die Oszillatorfrequenz bei verschiedenen Temperaturen stören und einen Anstieg des Kristallwiderstands oder „Aktivitätseinbrüche“ und daraus resultierende Frequenzausschläge verursachen. Diese Störungen treten typischerweise in einem schmalen Temperaturband auf. Es ist möglich, dass der Oszillator an diesen Stellen nicht mehr schwingt oder nicht mehr startet.

Mikrosprünge sind eine weitere Unregelmäßigkeit, die bei Temperaturänderung auftreten kann. Diese winzigen Sprünge werden bei normalen TCXO-Tests oft nicht beobachtet. Denn oftmals werden TCXOs nur an sechs oder acht Punkten über den Temperaturbereich getestet. Bei Anwendungen, wo diese Art von Unregelmäßigkeiten für die Systemleistung entscheidend ist, sollten die Oszillatoren über viel mehr Punkte getestet werden, etwa in 28 Intervallen. Für ein Höchstmaß an Zuverlässigkeit sollte die Frequenz jedes Oszillators kontinuierlich überwacht werden, während sich die Temperatur von einem Extrem zum anderen bewegt.

Bild 4 zeigt die Screening-Ergebnisse eines 20-MHz-TCXOs, der während des Rampenprofils von 8 K/min überwacht wurde. Während der gesamten Zeit wird die Ausgangsfrequenz kontinuierlich 50-mal pro Sekunde aufge-



**Bild 5: Hier wurde der Reading-Bereich gegenüber Bild 4 deutlich erweitert**

zeichnet, ohne dass zwischen den Messungen eine Totzeit liegt. Die blaue Linie ist ein Diagramm der Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Messwerten, das alle momentanen Sprünge hervorhebt. Dieser AT-Streifenquarz zeigt keine Störungen und nur ein paar kleine Mikrosprünge während des gesamten Tests, was auf einen TCXO mit außergewöhnlicher Leistung schließen lässt.

In Bild 5 wurde der Reading-Bereich deutlich erweitert. Die y-Achse ist die Frequenz in Hertz, die einen Schritt von etwa 10 ppb anzeigt. Diese kleinen Schritte sind ziemlich gut wiederholbar, obwohl sie möglicherweise nicht erscheinen, wenn die Temperatur in die entgegengesetzte Richtung gesteuert wird.

## Alterung

Die Alterung ist bei einem gut konstruierten Oszillator in erster Linie auf den Kristall zurückzuführen. Seine Resonanzfrequenz ändert sich aufgrund des Massentransfers zum oder vom

Quarzrohling. Auch das Nachlassen von Spannungen bei der Montage kann eine Rolle spielen.

Fortschritte in der Quarzkonstruktion und -verarbeitung haben die Alterung auf unter 1 ppm pro Jahr reduziert, selbst bei Miniaturgehäuse. Langfristige Prognosen für die 10- oder 20-jährige erwartete Lebensdauer eines Oszillators können weniger als 5 ppm betragen, da die Alterungsrate mit der Zeit abnimmt. Alterungseffekte können mit einer Kurvenanpassungsextrapolation projiziert werden unter Verwendung des logarithmischen MIL-SPEC-Modells.

## Beschleunigungsempfindlichkeit

Wenn die Betriebsumgebung des Oszillators Vibrationen und Stöße enthält, ist die Beschleunigungs- oder g-Empfindlichkeit ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ ) des Quarzes ein wichtiger Parameter. Denn Schwingungspegel modulieren den Ausgang, was zu Rauschseitenbändern auf dem Signal führt.

Stoßimpulse erzeugen kurze Störungen in der Frequenz, die für Phasenregelkreise oder ähnliche Schaltungen problematisch sein können. Die Miniatur-AT-Streifenquarze lassen sich so konstruieren, dass sie wenig empfindlich auf diese Kräfte reagieren. Werte unter  $5 \times 10^{-10}$  (oder  $5 \times 10^{-4}$  ppm) pro g in der Achse werden routinemäßig für kritische Anwendungen hergestellt. Aufgrund der Konstruktion des Streifenresonators und seiner Halterung ist die ungünstigste Achse für die Beschleunigung vorhersehbar. Der Vektor zeigt immer in die vertikale oder z-Achse, fast direkt senkrecht zur Kristallplatte. Die Empfindlichkeit in der x- und y-Achse ist extrem gering. Diese Kristalle können auch hohen pyrotechnischen Stößen standhalten. Einige wurden bis zu 100.000 g getestet.

## Zukünftige Trends

Da die grundlegende TCXO-Architektur in einen einzigen IC integriert wurde, der für viele Anwendungen geeignet ist, werden weitere Verkleinerungen

der Präzisionsoszillatoren kleinerer Resonatoren erfordern. Obwohl Quarzresonatoren im Bulk-Mode-Verfahren verkleinert werden können, ist es aus physikalischen Gründen nicht möglich, brauchbare Geräte unterhalb einer bestimmten Größe herzustellen.

Produkte mit SMT-Gehäuse  $3,2 \times 5 \text{ mm}$  oder kleiner sind mit vernünftigen Bewegungsparametern und Stabilitäten möglich. Eine Verkleinerung über dieses Maß hinaus erfordert jedoch möglicherweise eine Weiterentwicklung der Resonatortechnologien. Mikrobearbeitete Resonatoren aus Silizium können auf demselben Chip wie die Oszillatorschaltungen hergestellt werden. Diese Oszillatoren haben zwar noch nicht die Stabilität eines Präzisions-TCXO erreicht, aber weitere Verbesserungen sind auf dieses Ziel ausgerichtet. Diese Bauelemente könnten schon bald Quarzoszillatoren verdrängen, aber Quarzkristalle werden auch in absehbarer Zukunft für die präzise Frequenzsteuerung benötigt. ◀

## Fachbücher für die Praxis



## Hochfrequenz-Transistorpraxis

Schaltungstechnik, Einsatzprinzipien, Typen und Applikationen

Frank Sichla, 17,5 x 25,5 cm, 278 Seiten, zahlr. Abb. und Tabellen ISBN 978-3-88976-153-8, beam-Verlag 2008, 24,- € Art.-Nr.: 118070

Obwohl heute integrierte Schaltungen die Elektronik dominieren, haben diskrete Transistoren besonders im HF-Bereich noch immer hohe Bedeutung, denn es gibt einfach zu viele Problemstellungen, für die einzig und allein sie die optimale Lösung darstellen.

Diskrete Transistoren sind keineswegs „out“, sondern machen nach wie vor Fortschritte. Mit neusten Technologien werden immer höhere Frequenzen erschlossen sowie erstaunlich geringe Rauschfaktoren erzielt.

Dieses Buch beschreibt die Anwendung der Bipolar- und Feldeffekttransistoren im HF-Bereich, indem es die Schaltungstechnik praxisorientiert erläutert und mit einer Fülle von ausgewählten Applikationsschaltungen für Einsteiger als auch erfahrene Praktiker illustriert.

## Aus dem Inhalt:

- Bipolartransistoren
- Die „Bipo“-Grundsaltungen
- Die beliebtesten Schaltungstricks
- „Bipo“-Leistungsverstärker
- FETs im Überblick
- FET-Grundsaltungen
- SFETs, MESFETs und Dualgate-MOSFETs
- Die Welt der Power-MOSFETs
- Rund um die Kühlung
- Transistorschaltungen richtig aufbauen
- Kleinsignal-Verstärkerschaltungen
- HF-Leistungsverstärker
- Oszillatorschaltungen
- Senderschaltungen
- Mess- und Prüftechnik

Unser gesamtes Buchprogramm finden Sie unter [www.beam-verlag.de](http://www.beam-verlag.de) oder bestellen Sie über [info@beam-verlag.de](mailto:info@beam-verlag.de)