

wdi ag

TCXOs liefern präzise und zuverlässige Frequenzen

Mit den rasanten Fortschritten in der Elektronik haben temperaturkompensierte Quarzoszillatoren (TCXOs) eine bemerkenswerte Transformation durchlaufen.

Innovationen für bewährte Displays

Obgleich schon lange auf dem Markt, lassen sich TFT-LC-Displays noch immer optimieren.

Ist die Branche zukunftsfähig?

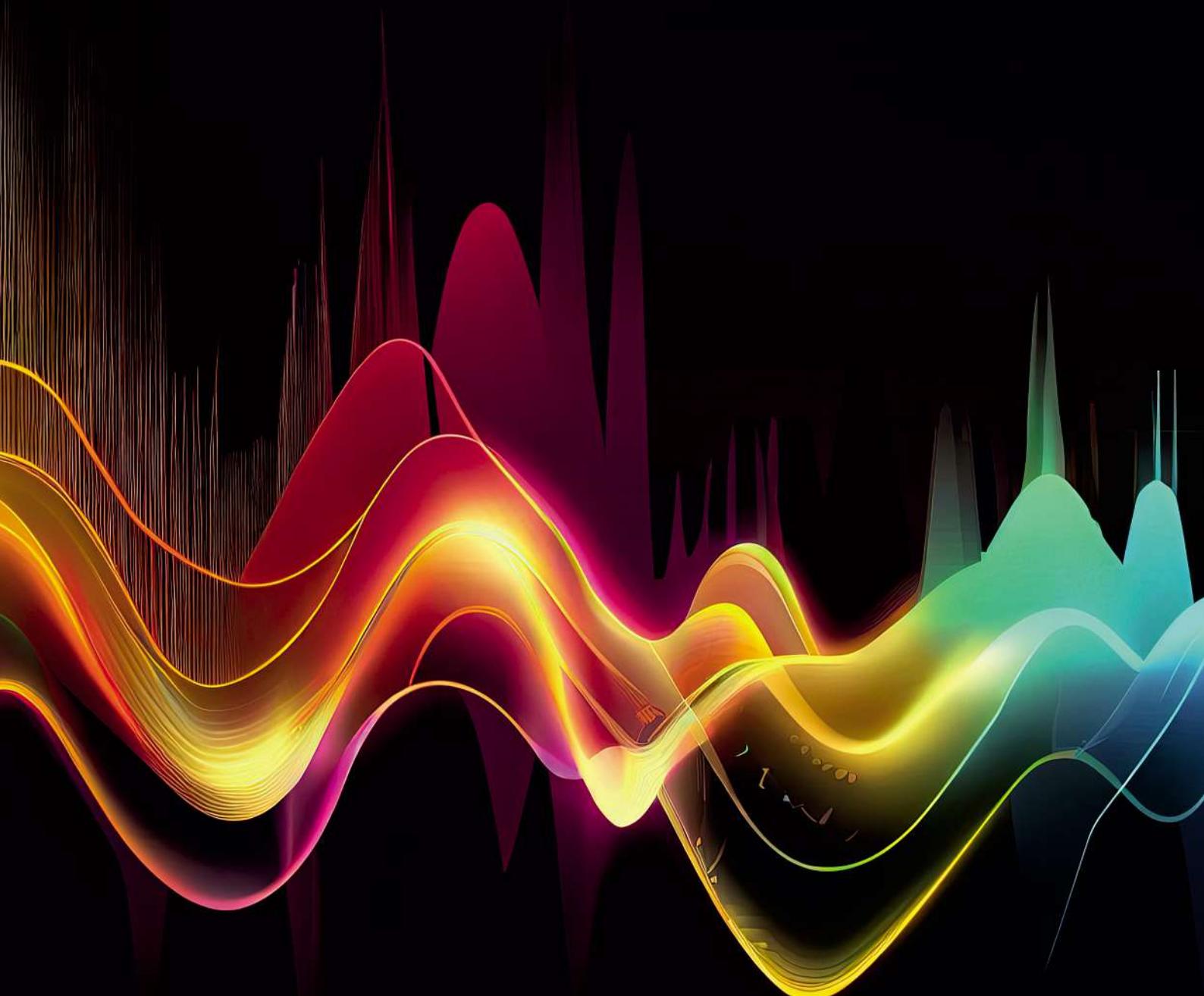
Die Elektronikbranche sucht nach neuen Wegen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

KI-gesteuertes Makro-Placement

Das KI-gesteuerte Makro-Placement von Aprisa erstellt einen Floorplan in Rekordzeit.

Steckverbinder für hohe Ströme

Bei der Auswahl von Steckverbindern für hohe Ströme sind etliche Punkte zu beachten.



TITELSTORY

Temperaturkompensierte Quarzoszillatoren

In einer Welt, in der Präzision und Zuverlässigkeit zunehmend an Bedeutung gewinnen, sind temperaturkompensierte Quarzoszillatoren (TCXOs) unverzichtbar. Diese Oszillatoren sind mit einem temperatursensitiven Reaktanzkreis ausgestattet, der aus einem Quarzresonator und einem Temperaturkompensationsnetzwerk besteht. Hierdurch können Frequenzabweichungen, die durch Temperaturschwankungen entstehen, erheblich reduziert und so eine konstante Frequenzstabilität sichergestellt werden. Wo herkömmliche Quarzoszillatoren (XOs) an ihre Grenzen stoßen, entfalten TCXOs ihr volles Potenzial, indem sie auch unter extremen Bedingungen eine außergewöhnliche Frequenzstabilität bieten.

HERAUSFORDERUNG TEMPERATUR

TCXOs liefern präzise und zuverlässige Frequenzen

Mit den rasanten Fortschritten in der Elektronikindustrie haben temperaturkompensierte Quarzoszillatoren (TCXOs) eine bemerkenswerte Transformation durchlaufen.

Fürher wurden für TCXOs diskrete Schaltungen verwendet, heute dagegen zunehmend ASIC-Technologie, die eine höhere Integration und Leistungsfähigkeit ermöglicht. Dank innovativer Fertigungstechniken und besserer Materialien gibt es nun leistungsstärkere und vielseitigere TCXOs, die auch den ständig wachsenden Herausforderungen gerecht werden. TCXOs sind in vielen Systemen zu finden, u. a. in drahtlosen Kommunikationssystemen, Mobiltelefonen, Basisstationen, Telekommunikationsanlagen, GPS-Positionierungssystemen, und zahlreichen weiteren Anwendungen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie ist ihre Fähigkeit, über einen festgelegten Arbeitstemperaturbereich eine stabile und präzise Ausgangsfrequenz zu gewährleisten.

Bild: WDI

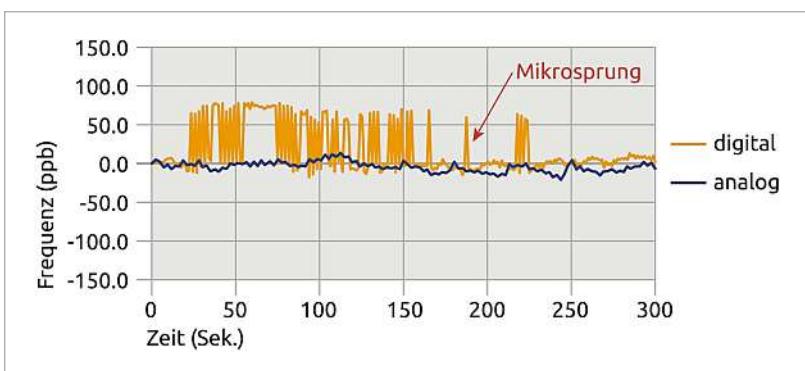


Bild 1:
Vergleich digitale und
analoge Kompensa-
tionstechniken.

Präziser dank Temperaturkompensation

Darüber hinaus bieten TCXOs hohe Frequenzstabilität, geringes Phasenrauschen und niedrigen Jitter. Sie bieten die Möglichkeit zur Spannungssteuerung (als VCTCXO) und haben einen niedrigen Stromverbrauch sowie eine kompakte Bauform. Damit sind sie die ideale Wahl für Anwendungen u. a. in der Hf- und Telekommunikation, in Netzwerken, dem Internet der Dinge, in Smart Metern, industriellen Prozessen oder der Medizintechnik. Die Temperaturkompensation ist entscheidend, um die Leistung eines Systems bei wechselnden Umgebungsbedingungen stabil zu halten. Dies geschieht durch die Reduzierung des Frequenzdrifts, der durch Temperaturschwankungen bei Quarzkristallen verursacht wird. Ein NTC-Thermistor liefert kontinuierlich Temperaturdaten an einen ASIC, der die notwendige Korrektur berechnet und die Steuerspannung entsprechend anpasst. Diese kontinuierliche Überwachung und präzise Anpassung ermöglicht es, Frequenzabweichungen auf extrem niedrige ppm- oder sogar ppb-Werte zu minimieren.

Anfänge und Tücken der TCXO-Technologie

In den Anfangsjahren der Funkkommunikation war die präzise Übertragung von Signalen eine große Herausforderung, insbesondere aufgrund der begrenzten Genauigkeit der damaligen Transceiver. Die Notwendigkeit für ein präziseres Taktsignal, das eine höhere Stabilität bei Temperaturschwankungen bot als die damals verfügbaren Oszillatoren, wurde schnell klar. Zu dieser Zeit hatten herkömmliche Oszillatoren eine Frequenzstabilität von



VERFASST VON
Hendrik Nielsen
Technical Sales
Specialist FCP
WDI AG

etwa 50 bis 100 ppm über einen bestimmten Temperaturbereich. Die Einführung eines analogen Kompensationsnetzwerks ermöglichte eine erhebliche Verbesserung der Frequenzstabilität und so konnten Stabilitäten im Bereich von damals sagenhaften 10 bis 20 ppm erreicht werden. Dies führte dazu, dass Sender- und Empfängerstationen auf exakt der gleichen Frequenz oder sehr nahe beieinander liegende Frequenzen arbeiten konnten, was die Kommunikationsqualität und -zuverlässigkeit erheblich steigerte. Diese bahnbrechende Technologie führte zur Entwicklung des temperaturkompensierten Quarzoszillators (TCXO), der die Basis für viele Fortschritte in der Kommunikationstechnologie bildete. Typische Anwendungen dieser frühen TCXOs umfassten die Frequenzkontrolle von Funksendern, die Frequenzsteuerung von Mobilfunkbasisstationen, die Regelung militärischer Kommunikationsgeräte und die präzise Frequenzmessung.

Vorteile mit Einschränkungen

Die frühen TCXOs revolutionierten zwar die Schaltungstechnik und ermöglichen deutlich stabile Frequenzen, jedoch brachten sie auch einige wesentliche Einschränkungen mit sich. Der Bau mit diskreten Bauteilen führt zu einer sogenannten „Toleranzaufsummierung“, bei der die Summe aller individuellen Bauteiltoleranzen sowie der Toleranzen der Leiterkarte zu potenziellen Frequenzfehlern führt. Jedes einzelne Bauteil besitzt seine eigene Genauigkeit, und mit jedem zusätzlichen Teil steigt das Risiko für Frequenzabweichungen. Trotz dieser Herausforderungen bot das analoge Kompensationsnetzwerk in den

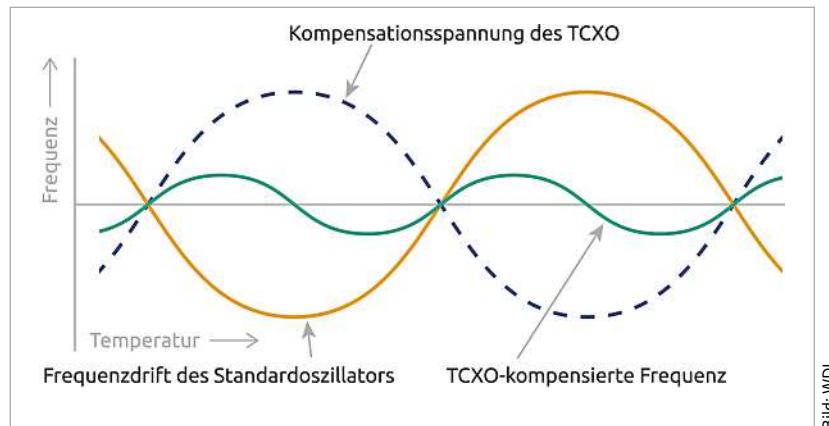


Bild 2:
Funktionsweise eines
TCXO – Veranschaulichung der Temperaturkompensation.

TCXOs erhebliche elektrische Designvorteile. Ein überraschender Vorteil dieser frühen Oszillatoren war die Fähigkeit, dank ihres diskreten Aufbaus die Kommunikation über große Entfernung zu unterstützen. Das Design ermöglichte Frequenzanpassungen durch analoge Kompensation, die später noch detaillierter erläutert wird, jedoch blieben bestimmte Bereiche weiterhin Verbesserungsbedürftig. So war die Frequenzstabilität trotz der erzielten Fortschritte bei wechselnden Temperaturbedingungen noch immer eine Herausforderung. Ein weiteres Problem war der hohe Stromverbrauch, der durch die Vielzahl an Bauteilen bedingt war. Besonders für frühe Navigatoren stellte dies ein erhebliches Problem dar, da die Stromversorgung unterwegs oft problematisch war.

Die Evolution der TCXO-Technologien

Mit dem stetigen Fortschritt in der Elektronikentwicklung haben Ingenieure immer neue Wege gefunden, um die Leistungsfähigkeit von Frequenzkomponenten weiter zu optimieren. Die heutigen modernen TCXO-Designs profitieren von einer Vielzahl innovativer Technologien, die speziell darauf abzielen, die Leistungsparameter umfassend zu verbessern. Durch den Einsatz fortschrittlicher Materialien, wie beispielsweise synthetischen Quarzen, präziseren Fertigungstechniken und fortschrittlicheren Schaltungsarchitekturen konnte die Frequenzstabilität erheblich gesteigert, das Phasenrauschen und der Jitter reduziert sowie die Gesamtleistung moderner TCXOs optimiert werden. Dank moderner Fertigungsprozesse zur Herstellung hochwertiger AT-Schnitt-Quarzkristallblanks erreichen heutige TCXOs sogar Stratum-Stabilitäten.

Eine interessante Entwicklung im Bereich der modernen TCXOs ist der Übergang von analoger zu digitaler Kompensation, vorangetrieben durch den Einsatz anwendungsspezifischer integrierter Schaltungen (ASICs). Diese ASIC-basierten TCXOs sind digitale Verarbeitungsschaltungen, die mit einem nicht-kontinuierlichen elektrischen Signal arbeiten. Obwohl die grundlegende Funktionalität eines TCXO unverändert bleibt, hat sich die Art der Kompensation durch diesen Wandel grundlegend verändert. Sobald eine Temperaturänderung den Schwellenwert für eine Kompensation erreicht, wird eine plötzliche Spannung angewendet, um die Frequenz augenblicklich auf die gewünschte Mittenfrequenz zurückzubringen. Diese abrupten Frequenzanpassungen werden als Mikro-Sprünge bezeichnet, welche jedoch in empfindlichen Schaltungen, die auf äußerst präzise Frequenzen angewiesen sind, zu

Problemen führen können. Eine effektive Methode, um diese Mikro-Sprünge deutlich zu minimieren, besteht in der Anwendung einer pseudo-analogen Kompensation. Anders als bei der digitalen Kompensation, die plötzliche Korrekturen vornimmt, sorgt die analoge Kompensation für ein kontinuierliches elektrisches Signal, das eine gleichmäßige Anpassung an die Temperatur ermöglicht. Indem die Kompensationsrate verlangsamt oder gedämpft wird, lassen sich plötzliche Frequenzänderungen weitgehend vermeiden. Mikro-Sprünge können insbesondere bei empfindlichen Verarbeitungsschaltungen und Phasenregelkreisen (PLL), die den TCXO als Taktgeber nutzen, zu Problemen wie Datenverlust oder Synchronisationsproblemen führen.

Auswirkungen der digitalen Kompensation

Das Diagramm in Bild 1 veranschaulicht die Auswirkungen der digitalen Kompensation im Vergleich zur analogen Kompensation über verschiedene Temperaturbereiche. Diese visuelle Darstellung verdeutlicht die Frequenzsprünge oder Mikro-Sprünge, die bei der digitalen Kompensation auftreten, und zeigt gleichzeitig die Vorteile der analogen Kompensation in Bezug auf Frequenzstabilisierung und Reduzierung von Mikrosprüngen.

Im orangefarbenen Diagramm, das die digitale Kompensation darstellt, sind deutliche und plötzliche Frequenzsprünge sichtbar, die als Mikrosprünge bezeichnet werden. Diese unregelmäßigen Sprünge können in empfindlichen elektronischen Schaltungen Probleme verursachen. Das blaue Diagramm hingegen zeigt die analoge Kompensation, die durch eine gleichmäßige und kontinuierliche Anpassung der Frequenz gekennzeichnet ist, nahezu ohne Mikrosprünge. Die beiden Diagramme verdeutlichen die Vorteile der analogen Kompensation in Bezug auf Stabilität und Störungsminimierung.

Im Chip integrierter Temperatursensor

Moderne TCXOs nutzen einen im Chip integrierten Temperatursensor, der kontinuierlich die Umgebungstemperatur überwacht und selbstständig Korrekturen vornimmt, um eine stabile Frequenzausgabe sicherzustellen. Dieser automatische Kalibrierungsprozess ist entscheidend, um eine gleichbleibende Leistungsfähigkeit des Oszillators zu gewährleisten, insbesondere in Anwendungen, die auf hohe Frequenzstabilität angewiesen sind.

Ein TCXO kann beispielsweise über den industriellen Betriebstemperaturbereich von -40 bis 85 °C auf eine Stabilität von weniger als 1 ppm kompensiert werden. Diese hohe Präzision ist unter anderem für Designs wie Stratum, GPS, RF-Kommunikation, Femtocells und mobile Konnektivitätslösungen unerlässlich, da hier ein exaktes Timing unabdingbar ist.

In Bild 2 wird die Funktionsweise von TCXOs veranschaulicht, indem nicht kompensierte und kompensierte Frequenzverläufe dargestellt werden. Die geplotteten Daten zeigen, wie sich die TCXO-kompensierte Frequenz über verschiedene Temperaturbereiche hinweg verhält.

Die graue Linie im Diagramm repräsentiert die angestrebte Basisfrequenz. Die orangefarbene Linie hingegen zeigt die Frequenzdrift eines Standardoszillators in Abhängigkeit von der Temperatur. Entlang der orangefarbenen Linie sind deutliche Frequenzabweichungen erkennbar, die mit steigender oder fallender Temperatur auftreten. Die blau gestrichelte Linie stellt die Kompensationsspannung dar, die

dem Steuerspannungseingang des TCXO zugeführt wird. Wie im Diagramm erkennbar, wird ein inverses Signal angewendet, das den durch Temperaturveränderungen verursachten Fehler nahezu vollständig ausgleicht. Die grüne Linie stellt die Summe der orangen Linie (Frequenzdrift) und der gestrichelten Linie (Kompensation) dar. Diese zeigt eine deutlich verbesserte Stabilität, wobei nur minimale Frequenzabweichungen verbleiben. Dieses Prinzip der Temperaturkompensation findet Anwendung in verschiedenen Bereichen, in denen eine hohe Rausch- und Stabilitätspräzision gefordert ist, wie etwa in geräuschunterdrückenden Kopfhörern oder allgemein in der Audiotechnik.

I Methoden der Temperaturkompensation

Es gibt verschiedene Methoden zur Temperaturkompensation, die je nach Einsatzgebiet unterschiedliche Vorzüge und Schwächen aufweisen. Im Folgenden werden wir die wesentlichen Methoden näher betrachten.

Ein **Analog Digital Temperature Compensated Crystal Oscillator** (ADTCXO) nutzt analoge Techniken, um die Frequenz eines Oszillators an Temperaturänderungen anzupassen. Diese Methode ermöglicht eine langsame und gleichmäßige Kompensation der Ausgangsfrequenz, wodurch Mikro-Sprünge oder plötzliche Frequenzänderungen effektiv vermieden werden. Aufgrund dieser Eigenschaften findet der ADTCXO häufig Anwendung in Mobiltelefonen, bei denen eine stabile und präzise Frequenz besonders wichtig ist.

Der **Digital Temperature Compensated Crystal Oscillator** (DTCXO, Bild 3) kompensiert die Frequenzdrift, die durch Temperaturänderungen verursacht wird, durch den Einsatz eines Temperatursensors und eines Digital-Analog-Wandlers (DAC) in Kombination mit logischen Funktionen. Der Temperatursensor erfasst die Umgebungstemperatur und übermittelt diese an die Logikschaltung, die auf eine gespeicherte Lookup-Tabelle zugreift, um den entsprechenden digitalen Kompensationswert auszuwählen. Dieser digitale Wert wird anschließend durch den DAC in ein analoges Signal umgewandelt, das den Schwingquarz entsprechend korrigiert, um eine stabile Frequenzausgabe zu gewährleisten.

Ein **Digitally Controlled Crystal Oscillator** (DCXO) nutzt komplexe Algorithmen, darunter Frequenzschätzung, Korrektur- und Nachführungsalgorithmen, um die Frequenz präzise zu steuern. Durch diesen algorithmischen Ansatz bietet der DCXO eine besonders stabile Ausgangsfrequenz, die in der Regel besser ist als bei anderen Varianten wie VCXO und TCXO. Diese Art von Oszillator wurde häufig von Herstellern von GSM-Mobiltelefonen verwendet, um die hohe Stabilität und Genauigkeit sicherzustellen, die in diesen Anwendungen erforderlich ist.

Ein **Microprocessor Compensated Crystal Oscillator** (MCXO) nutzt Mikroprozessoren, um eine präzise und effiziente Frequenzkompensation durchzuführen. Statt Lookup-Tabellen werden Analog-Digital-Wandler (ADC) und Digital-Analog-Wandler (DAC) verwendet, um die Kompensation in Echtzeit zu berechnen und anzupassen. Diese Methode ermöglicht eine hohe Leistungsfähigkeit, was jedoch zu höheren Kosten im Vergleich zu anderen Temperaturkompensationsmethoden führt. MCXOs werden oft in anspruchsvollen Bereichen wie Satellitenkommunikationssystemen und hochpräzisen Messinstrumenten eingesetzt, wo höchste Stabilität und Genauigkeit erforderlich sind.

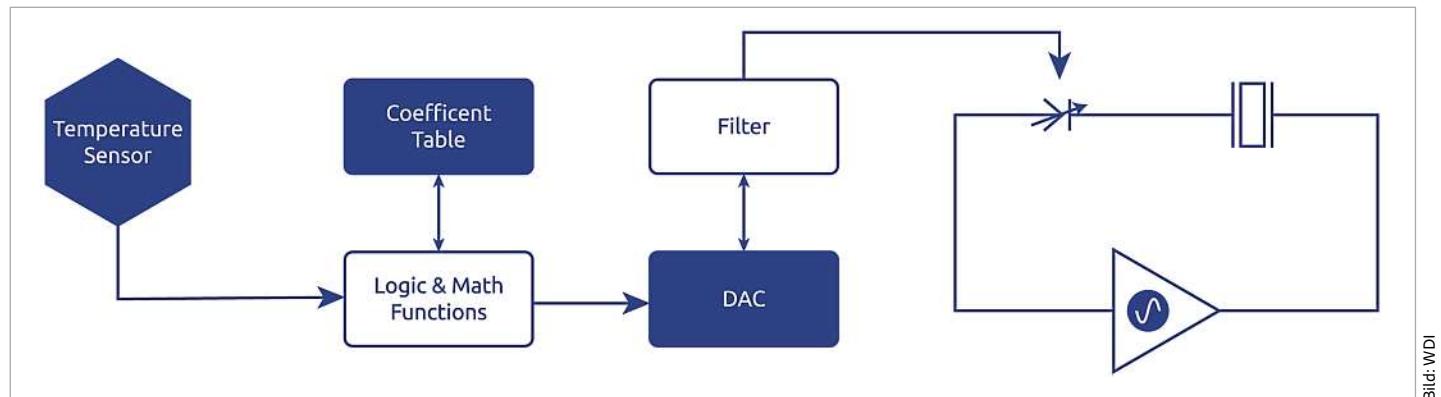


Bild 3:
Blockschaltbild eines
DTCXO.

Der **Voltage Controlled Temperature Compensated Crystal Oscillator** (VCTCXO) kombiniert die Vorteile eines TCXO – wie niedrigen Stromverbrauch, exzellente Temperatureigenschaften und schnelle Aufwärmzeiten – mit der zusätzlichen Funktion der Spannungssteuerung. Diese ermöglicht eine präzise Feinabstimmung und Kalibrierung der Ausgangsfrequenz nach der Montage auf der Leiterplatte und kompensiert die Auswirkungen der Alterung des Oszillators im Feld. VCTCXOs sind besonders geeignet für Anwendungen, die präzise Frequenzanpassungen und langfristige Zuverlässigkeit erfordern. Typische Einsatzgebiete umfassen die Funkkommunikation, die Synchronisierung von Netzwerken und die Satellitennavigation, wo präzise Frequenzkontrolle von entscheidender Bedeutung ist.

■ Miniaturisierung und Integration von TCXOs

Die Miniaturisierung von TCXOs wird vor allem durch die Kontrolle von Stressfaktoren erreicht, die zur Alterung der Quarzkristalle beitragen können. Die fortschreitende Integration von TCXOs in System-on-Chip (SoC)-Lösungen und multifunktionale Module hat die Leistungsfähigkeit und Flexibilität von Designs erheblich verbessert. Beispielsweise ermöglichen integrierte SoCs in mobilen Geräten eine kompakte Bauweise und reduzieren den Energieverbrauch durch die Kombination von TCXOs mit Phasenregelkreisen (PLLs) und Frequenzsynthesizern auf einem einzigen Chip. Dies führt zu einer höheren Energieeffizienz und einer besseren Gesamtleistung in modernen, kompakten elektronischen Systemen.

Durch die Weiterentwicklung in der Geometrie von Quarzkristallen und in der Halbleiterfertigung ist es gelungen, TCXOs noch kleiner zu gestalten. Diese kompakten Oszillatoren finden Anwendung in Bereichen wie mobilen Endgeräten, intelligenten Geräten und sensorbasierten Technologien. Diese miniaturisierten TCXOs sind speziell darauf ausgelegt, mit minimalem Stromverbrauch zu arbeiten, was sie besonders für batteriebetriebene und energieeffiziente Geräte geeignet macht. Sie tragen zur Verlängerung der Batterielebensdauer bei, ohne die Präzision der Zeitmessung zu beeinträchtigen.

Heutzutage werden TCXOs oft zusammen mit Phasenregelkreisen (PLLs), Frequenzsynthesizern, Frequenzteilen und spannungsgesteuerten Oszillatoren (VCTCXOs) in einem einzigen Chip oder Modul integriert. Diese Kombination reduziert die Anzahl der erforderlichen Komponenten, spart Platz auf der Platine und senkt den Energieverbrauch. Trotz ihrer kompakten Bauform bieten moder-

ne TCXOs exzellente Frequenzstabilität und Genauigkeit über einen breiten Temperaturbereich. Fortschrittliche Kompensationstechniken, präzise Temperatursensoren und digitale Kalibrierungsalgorithmen sorgen dafür, dass TCXOs auch in herausfordernden Betriebsumgebungen zuverlässige Zeitreferenzen liefern.

■ Trends und Ausblick

Die kontinuierlichen Fortschritte im Siliziumdesign und in der Quarzkristalltechnologie versprechen erhebliche Weiterentwicklungen der TCXO-Technologie, die sowohl die Gesamtleistung als auch den Energieverbrauch weiter optimieren werden. Derzeit bieten Standard-TCXOs eine Temperaturstabilität von etwa $\pm 2,5$ ppm, mit einem möglichen Stabilitätspotenzial von ± 50 ppb. Mit den fortlaufenden technologischen Innovationen ist zu erwarten, dass höhere Stabilitätsniveaus immer stärker nachgefragt werden. Im Hinblick auf zukünftige Anforderungen wurden bereits Stratum-3-TCXOs entwickelt, die eine bemerkenswerte Frequenzstabilität von $\pm 4,6$ ppm bieten. Diese Stabilität umfasst eine Vielzahl von Einflussfaktoren wie Kalibrierung bei 25°C , Versorgungsspannung $V_{\text{DD}} \pm 5$ Prozent, Last ± 10 Prozent, Reflow-Lötung, 20 Jahre Alterung sowie Frequenzstabilität über verschiedene Temperaturen. Die Weiterentwicklung in diesem Bereich deutet darauf hin, dass künftige TCXOs noch präzisere und zuverlässigere Zeitreferenzen liefern werden, um den steigenden Anforderungen moderner Anwendungen gerecht zu werden.

Angesichts des rasanten technologischen Wandels ist es für Ingenieure und Designer entscheidend, stets über die neuesten Entwicklungen informiert zu bleiben, um die bestmögliche Leistung ihrer Systeme zu gewährleisten. Die Auswahl des optimalen TCXOs für spezifische Anforderungen kann dabei eine anspruchsvolle Aufgabe darstellen, wobei die Spezialisten der WDI AG bereits beim Design-In unterstützend zur Seite stehen, geeignete Bauformen und Spezifikationen empfehlen sowie passende Alternativen und Second Sources aufzeigen.

Der Service der WDI-Spezialisten umfasst sämtliche Phasen, von der Erstbemusterung und eventuell notwendigen Schaltungsanalysen über die Prototypen- und Vorserialienbelieferung bis hin zur klassischen Distributionsdienstleistung während der Serienfertigung. Durch umfassende Unterstützung gewährleistet WDI, dass Entwickler den für ihre Anwendung optimalen TCXO finden und einsetzen können – sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Perspektive. (tk)