

Hochstabile Taktung für moderne vernetzte Geräte

Was macht einen TCXO so besonders?

Im ersten Dokument dieser Reihe haben wir einen Überblick über die verschiedenen Arten von Oszillatoren gegeben und dabei auch kurz den **TCXO** sowie dessen Einsatz in elektronischen Designs angesprochen. In diesem Dokument gehen wir tiefer auf die Rolle von TCXOs ein und berücksichtigen dabei sowohl die technische Entwicklung als auch die kommerziellen Aspekte.

Ein TCXO (temperaturkompensierter Quarzoszillator) wird in Anwendungen eingesetzt, bei denen Frequenzstabilität und Präzision auch bei Temperaturänderungen zwingend erforderlich sind. Eine Korrekturspannung wird durch eine Temperaturerfassungs- und Kompensationsschaltung erzeugt, die kontinuierlich zur Frequenzkorrektur verwendet wird.

Die Temperaturkennlinie eines typischen TCXO verläuft relativ flach und zeigt nur geringe Abweichungen, verglichen mit einem nicht kompensierten Quarz, dessen Verlauf eine parabolische Form aufweist. Beide Verläufe sind in Abbildung 1 dargestellt.

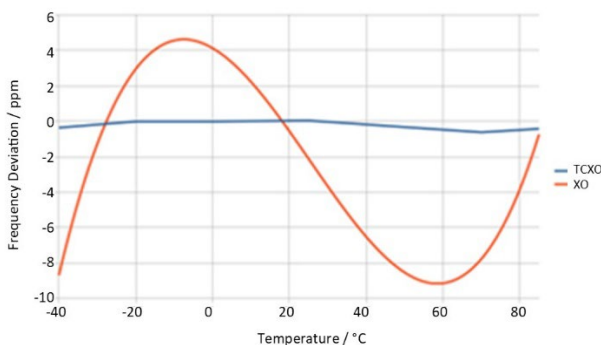


Figure 1: TCXO compensation curve over temperature

Der Temperatursensor misst die Umgebungstemperatur, wodurch die Kompensationsschaltung aktiviert wird und die Frequenz des Oszillators wieder auf die Nennfrequenz eingestellt wird.

Unabhängig von der Art des **Kompensationsmechanismus** – analog, digital oder hybrid – **ist dies das zentrale Funktionsprinzip eines TCXO**

Die Rolle von TCXOs in elektronischen Schaltungen

Die Rolle von TCXOs nimmt zu, da es immer mehr Anwendungen gibt, in denen Entwickler den Einsatz eines präzisen Oszillators anstelle eines Quarzes in Betracht ziehen und dabei die offensichtliche Übergangskostensteigerung akzeptieren.

Neben der Bereitstellung eines zuverlässigen Referenztakts für digitale Schaltungen und HF-Systeme (RF-Systeme) bieten TCXOs eine deutlich bessere Stabilität als herkömmliche Frequenzkomponenten.

Ein Standardquarz ist typischerweise für eine Frequenzstabilität von etwa 12–50 ppm über die Temperatur ausgelegt, während ein normaler XO-Oszillator im gleichen industriellen Temperaturbereich eine Frequenzstabilität von etwa 20–50 ppm aufweist.

Ein TCXO kann die Frequenzdrift je nach Anwendungsanforderung typischerweise auf etwa 0,5–5 ppm reduzieren. Nur ein OCXO (Ofen-geregelter Oszillator / Oven-Controlled Oscillator) kann diesen Wert auf etwa 0,01 ppm unterschreiten – allerdings mit dem Nachteil eines deutlich höheren Leistungs- bzw. Energieverbrauchs.

TCXOs werden häufig eingesetzt in:

- **GPS-Empfängern**, da diese eine sehr präzise Zeitbasis benötigen
- **Drahtlosen Kommunikationssystemen** (LTE, Wi-Fi, Bluetooth)
- **Hochpräzisen Mess- und Prüfgeräten** (Test- und Messtechnik)
- **Medizinischen Geräten**, die eine hohe Präzision erfordern
- **IoT-Geräten**, bei denen große Temperaturschwankungen auftreten können
- **Digitalen Systemen**, bei denen die **Taktgenauigkeit** eine wichtige Rolle spielt

Komponentenauswahl

Viele Fachartikel und White Papers in der Bauelementeindustrie konzentrieren sich auf die Definition und Funktionsweise eines temperaturkompensierten Quarzoszillators (TCXO) und stellen Anwendungsfälle vor, in denen ein TCXO besser geeignet ist als ein normaler Oszillator.

Es gibt jedoch nur wenige Informationen darüber, wann ein Design mit hochpräzisen Quarzen ausreichend ist und wann ein TCXO die Anforderungen der Anwendung besser erfüllt.

Unter Berücksichtigung der wichtigsten technischen Aspekte sowie der Kosten haben wir die Ergebnisse in der untenstehenden Tabelle zusammengefasst. Die Ergebnisse sind eher qualitativ als quantitativ, da ein gründlicher Vergleich nur für eine klar definierte Anwendung mit konkreten technischen Entwicklungszielen sinnvoll ist.

Selbst in einem solchen Fall werden Komponenten nicht unbedingt ausgewählt, weil sie die technisch beste Lösung darstellen, sondern weil sie den Anwendungsanforderungen bei einer passenden Kostenposition gerecht werden.

Feature	Crystal (XTAL)	XO	TCXO	VCXO	OCXO
Komponentenbeschreibung	Quarz (passiv)	Aktiv (Quarz + Oszischaltung)	XO + Temperaturkompensation	XO mit Voltage control	XO in temperature controlled oven
Temperatur Stabilität	15–100 ppm	20–100 ppm	0.5–2.5 ppm	Ähnlich wie XO	0.001–0.01 ppm
Lang-Zeit Genauigkeit	niedrig	niedrig	medium–hoch	medium	sehr hoch
Stromverbrauch	n.a.	niedrig	niedrig-medium	niedrig	hoch
Warm-up Time	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1–5 min
Kosten	sehr niedrig	niedrig	medium	medium	hoch
Größe	klein	klein	klein	klein	groß
Temperaturverhalten	+	+	++	+	+++
Geeignet für	Lowest cost-timing	General-purpose timing	Sehr stabiles timing über den Temperaturbereich	Tunable clock	Sehr stabile Frequenz
Gängige Applikationen	MCUs Consumer electronics Einfache Schaltungen	Ähnlich wie bei Quarzen	GPS/GNSS;LTE/5G/Wi-Fi/Bluetooth IoT/Industrial devices Handheld radios Test equipment	PLLs & frequency synthesis Telecom Sync Jitter-cleaning Clock/data recovery	Frequency standards Base stations High-end test instruments Military/aerospace Precision RF systems

Betrachtet man den obigen Vergleich, könnte man zu dem Schluss kommen, dass OCXOs für Anwendungen in Betracht gezogen werden sollten, bei denen die Frequenz über den Temperaturbereich hinweg extrem stabil sein muss. Während dies in der Vergangenheit häufig der Fall war, benötigen viele Designs heute keine ultrastabilen Rohoszillatoren mehr, da zahlreiche Systeme die Stabilität inzwischen über Software oder Firmware ausgleichen. Daher gewinnen TCXOs in elektronischen Designs zunehmend an Bedeutung.

Obwohl sie insgesamt weniger verbreitet sind, bleiben OCXOs in Anwendungen unverzichtbar, die eine extrem stabile Frequenz erfordern – allerdings nur, wenn Leistungsaufnahme, Baugröße und Aufwärmzeit akzeptiert werden können.

Worauf kommt es bei der Auswahl eines TCXO an? Wo liegt der 'Technische Break-Even'?

Die Bedeutung von TCXOs in Designs nimmt kontinuierlich zu, angetrieben durch Anwendungen mit immer höheren Anforderungen.

Fassen wir die Ergebnisse unserer Analyse in einzelnen Anwendungsfällen zusammen, kommen wir zu folgenden Schlussfolgerungen:

- TCXOs sind überall dort unverzichtbar, wo eine äußerst präzise Zeitbasis und Signalsynchronisation erforderlich sind, da sie Temperaturschwankungen am besten kompensieren.
- Die Entscheidung zwischen Quarzkristall und Oszillator/TCXO muss von den F&E-Entwicklern (R&D) fallweise getroffen werden und sollte auf einer mittel- bis langfristigen wirtschaftlichen Betrachtung basieren: erforderliche Präzision der Anwendung versus Kosten. **Es handelt sich nicht um eine einfache Entscheidung auf reiner Komponentenebene.** Ein Quarz bleibt zwar stets die kostengünstigste Frequenzkomponente, bildet jedoch allein keine Oszillatorschaltung mit der besten Genauigkeit über den Temperaturbereich.
- Mit steigenden Präzisionsanforderungen sinken gleichzeitig die Produktionskosten von TCXOs, da die Stückzahlen steigen.
- TCXOs werden in naher Zukunft zu „Commodity“-Produkten werden.
- Im Gegensatz zu Anwendungen wie 5G-Netzen oder der Luftfahrt benötigt jedoch nicht jede Anwendung extrem leistungsfähige oder spezialisierte TCXOs.

Letztlich gibt es keinen allgemeinen „technischen Break-Even-Punkt“ für TCXOs. Es handelt sich vielmehr um eine bewusste technische Entscheidung, bei der die anfangs höheren Kosten des Produkts oder der Dienstleistung akzeptiert werden.

Der optimale Kompromiss („Sweet Spot“) eines TCXO zwischen Leistung, Energieverbrauch und Kosten für typische Anwendungen wäre:

Technische Parameter	TCXO
Frequenz	10 MHz
Output Signal	Clipped sine
Output Amplitude	1.0 Vpp into 50 Ω
Temperatur Stabilität	1.0 ppm
Lang-Zeit Genauigkeit	Medium–High
Phase noise @ 10 kHz offset	–140 dBc/Hz
Stromverbrauch	15mW
Supply voltage	3.3V
Größe	2.0x1.6 mm

Fazit

Während die Entwicklung in der Verteidigungsindustrie, bei 5G-Netzen und in der Luft- und Raumfahrt die Weiterentwicklung von Hochleistungs-TCXOs über einen großen Temperaturbereich hinweg stark vorantreibt, setzen der Automatisierungssektor, Smart-Environment-Anwendungen, IoT-Anwendungen und zunehmend auch der Gesundheitssektor vermehrt auf gängigere TCXOs, bei denen Präzision, Miniaturisierung und niedriger Energieverbrauch Hand in Hand gehen.

Der TCXO entwickelt sich kontinuierlich weiter und bietet zuverlässige Frequenzstabilität in nahezu jeder Umgebung.