

32.768 kHz – Weit mehr als nur ein Takt

Die Rolle eines 32.768-kHz-Quarzes in elektronischen Schaltungen

Der Einsatz von zwei Quarzen im selben Design – einem für den hochfrequenten Systemtakt und einem für einen Standby- bzw. Low-Power-Takt – ist ein sehr verbreitetes Konzept in Embedded- und elektronischen Systemen.

Ergänzend zu den Designaspekten und Regeln, die wir in den drei vorherigen Beiträgen dieser Serie behandelt haben, konzentrieren wir uns nun auf die Rolle sowie auf die Auslegungs- und Designaspekte des 32.768-kHz-Quarzes, auch bekannt als Stimmgabelquarz.



Was ist ein Stimmgabelquarz (Uhrenquarz) und warum 32.768 kHz?

Ein Stimmgabelquarz, auch als Uhrenquarz bekannt, ist eine spezielle Art von Quarzkristall, der bei Anlegen eines elektrischen Feldes mechanisch in der Form einer Stimmgabel schwingt. Die Stimmgabel wird mechanisch durch Sägen oder Ätzen aus dem Kristall herausgearbeitet und weist im Gegensatz zu konventionellen Quarzen, die üblicherweise einen AT-Schnitt besitzen, einen X- oder XY-Schnitt auf.

Aufgrund ihrer speziellen Bauform weisen Uhrenquarze folgende Eigenschaften auf:

- Sie schwingen mit einer vergleichsweise sehr niedrigen Grundfrequenz.
- schwingen typischerweise bei 32.768 kHz, was 2^{15} Hz entspricht.
- werden als Echtzeituhr (RTC) und für Low-Power-Zeitfunktionen eingesetzt.
- sind stabil, energieeffizient und kompakt.
- ermöglichen eine verbesserte Anschwingreserve und eine kürzere Anlaufzeit.
- sind zuverlässig bei gleichzeitig reduzierter Quarzbelastung.
- sind für Hochgeschwindigkeitsanwendungen nicht geeignet.

Zwei-Quarz-Designs (Haupttakt + Standby-Takt) sind äußerst verbreitet, wenn eine präzise Zeitmessung bei gleichzeitig niedrigem Energieverbrauch erforderlich ist. Sie finden Verwendung in:

- Den meisten Mikrocontrollern mit RTC (Real-Time Clock)
- Funksystemen
- Wearables und IoT-Knoten
- Zählern, Datenloggern, Uhren und industriellen Steuerungen
- Smartphones und Tablets
- Automobilelektronik

Ein einzelner Quarz wird üblicherweise verwendet, wenn:

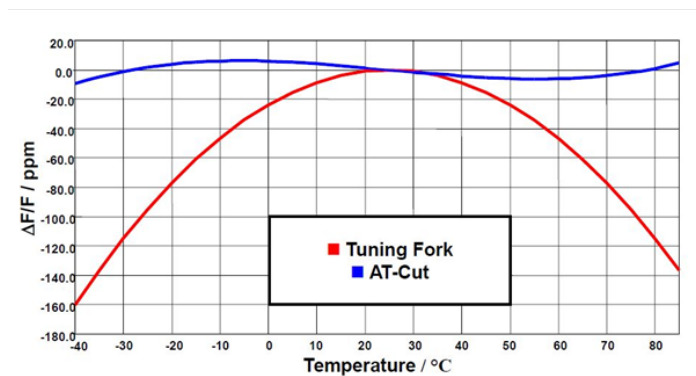
- Der Mikrocontroller über einen internen RTC-Oszillator verfügt.
- Die Zeitgenauigkeit nicht kritisch ist (z. B. bei Spielzeugen).
- Das Gerät keinen Sleep-Modus verwendet.
- Kein hochgenauer Zeitstempel erforderlich ist.

Komponentenwahl

Was ist bei der Auswahl eines Stimmgabelquarzes zu beachten?

Neben den allgemeinen Parametern, die für ein gutes Quarzdesign wichtig sind und die wir in unseren vorherigen Beiträgen dieser Tutorial-Reihe behandelt haben, gibt es einen besonderen Aspekt, der beim Stimmgabelquarz berücksichtigt werden muss – nämlich die Temperaturstabilität.

Während ein Temperaturbereich von -40 °C bis $+85\text{ °C}$ heute als Standard gilt, sind Anforderungen bis $+105\text{ °C}$ oder sogar $+125\text{ °C}$ längst keine Seltenheit mehr. Obwohl diese Temperaturen für einen herkömmlichen Quarz in der Regel kein Problem darstellen, ist bei der Auslegung mit 32.768-kHz-Quarzen besondere Aufmerksamkeit erforderlich.



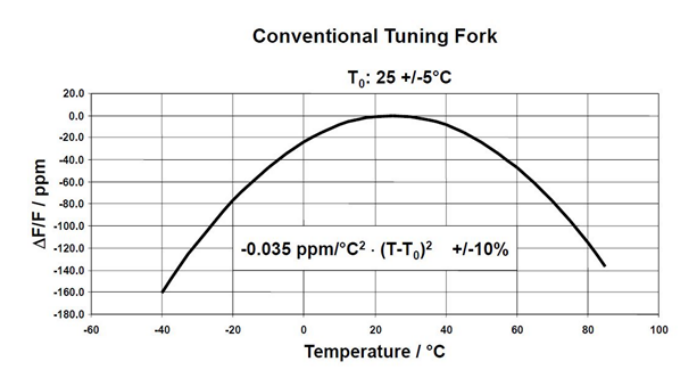
Aus der obigen Abbildung ist ersichtlich, dass die Temperaturkennlinie eines Stimmgabelquarzes deutlich von der eines konventionellen AT-Cut-Quarzes abweicht.

Das Temperaturverhalten (Frequenzabweichung über der Temperatur) eines Stimmgabelquarzes wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\text{Abweichung [ppm]} = -PC \text{ [ppm/}^\circ\text{C}^2] \cdot (T - T_0)^2$$

Es handelt sich dabei um eine nach unten geöffnete Parabel mit dem Scheitelpunkt bei

$T_0 = +25\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ (Referenztemperatur). [PC = Parabelkoeffizient]



Es ist erkennbar, dass der Quarz stets nachläuft, sobald die Betriebstemperatur von der Referenztemperatur abweicht. Je weiter die Temperatur von +25 °C entfernt ist, desto größer wird die Abweichung. Bei +125 °C beträgt diese im dargestellten Fall typischerweise etwa -350 ppm; unter Berücksichtigung aller Toleranzen (z. B. Lastkapazitäten) kann sie deutlich höher ausfallen.

In Anwendungen, in denen der Uhrenquarz lediglich einen Controller im Standby-Betrieb aktiv hält, mag dies unkritisch sein. Wenn die Anwendung jedoch auf eine präzise Zeitbasis oder eine RTC (Real-Time Clock) angewiesen ist, können sich selbst kleinste Zeitfehler im Laufe eines Jahres erheblich aufsummieren. Abweichungen von mehreren Dutzend Minuten sind keine Seltenheit.

Die Auswahl eines Quarzes mit höherer Grundgenauigkeit führt in der Regel nicht zum gewünschten Ergebnis, da sich die Angabe der Grundgenauigkeit **ausschließlich** auf +25 °C bezieht. Die grundlegende Temperaturkennlinie bleibt unverändert.

Eine hardwareseitige Lösung, beispielsweise durch Anpassung der Beschaltung mittels geeigneter Lastkapazitäten, ist nur in einem engen Temperaturbereich erfolgversprechend (z. B. bei Armbanduhren).

Was ist also entscheidend für ein gutes Design?

Die Antwort lautet: die sorgfältige Auswahl der Komponente anhand einer Checkliste sowie **ein zuverlässiger Design-Validierungsmechanismus**.

Checklist	Beschreibung
Lastkapazität (C_L)	Passende Lastkapazität für MCU/RTC (z. B. 6, 7, 9, 12.5 pF)
ESR	ESR unter MCU-Maximalwert für zuverlässigen Start
Drive Level	Leistungsaufnahme prüfen (typ. 0.5–1 μ W)
Frequenztoleranz	Anfangsgenauigkeit bei 25 °C (± 10 –30 ppm)
Temperaturstabilität	Frequenzdrift über Temperatur (C-Kurve)
Temperaturbereich	Geeignet für Einsatzbedingungen (z. B. –40 bis +85 °C)
Aging (Alterung)	Langzeitdrift beachten (± 3 ppm/Jahr)
Baugröße	Gehäusegröße in Balance zwischen Stabilität und PCB-Platz
Startup Time	Oszillator-Anlaufzeit passend zum Sleep/Wake-Profil
Shock/Vibration Rating	Robuste Quarze für Wearables/Industrie
Lastkapazitäten (C_1 , C_2)	Gesamtlaukapazität (C_L) korrekt berücksichtigen
PCB Streukapazität	Leiterbahn- und Pad-Kapazität (~ 1 –3 pF) einplanen

Schaltungsverifizierung für Uhrenquarze

Für Anwendungen, die auf eine genaue Zeitbasis angewiesen sind oder über einen längeren Zeitraum eine präzise Zeitmessung erfordern (z. B. Zähler- bzw. Verbrauchserfassung), ist es unerlässlich, die typische Temperaturkennlinie mittels Software (z. B. durch eine Look-up-Tabelle) zu **kompensieren** und gleichzeitig die Zeit in regelmäßigen Abständen mit **einer übergeordneten Referenz zu synchronisieren** (z. B. Datenkonzentrator, Funkuhr oder manuell durch eine Person). Nur durch diese Maßnahmen kann die korrekte und zuverlässige Funktion der Anwendung gewährleistet werden.

Um die Vorteile von Quarzen mit geringerer Lastkapazität zu bewerten, wurden zwei Uhrenquarze mit 12.5 pF und 7 pF miteinander verglichen. Die Ergebnisse sprechen für sich:

Testkriterium	$C_L = 12.5 \text{ pF}$	$C_L = 7 \text{ pF}$
Oszillatorstrom	3.8 μ A	3.4 μ A (lower)
Oszillatorreserve	6	13 (better)
Start-up time	1.1 s	0.6 s (shorter)
Drive level	2.5 μ W	1.2 μ W (lower)

Ein Nachteil sollte jedoch nicht verschwiegen werden: Aufgrund der geringen Lastkapazität reagiert die Oszillatorschaltung mit einem 7 pF Quarz empfindlicher auf Bauteiltoleranzen in der Schaltung.

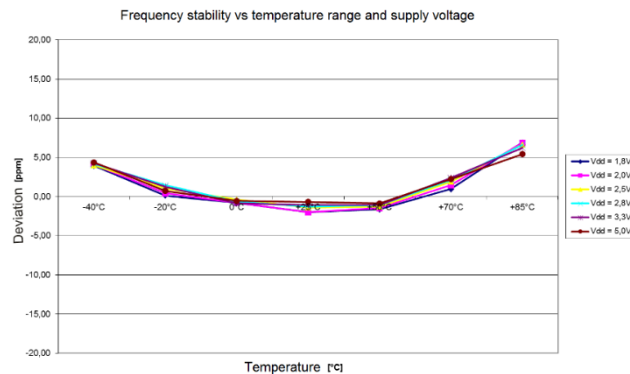
Daher gilt: Ist der Energieverbrauch entscheidend, sollte ein Quarz mit niedriger Lastkapazität eingesetzt werden. Für Anwendungen, die eine höhere Präzision erfordern, ist ein Quarz mit höherer Lastkapazität die bessere Wahl.

Alternativen zu Uhrenquarze

Für höhere Anforderungen an die Temperaturstabilität kann alternativ ein temperaturkompensierter 32.768-kHz-Oszillator eingesetzt werden, entweder im 3.2 x 1.5 mm-Gehäuse oder als herkömmlicher HCMOS-Oszillator, z. B. 1.6 x 1.2 mm.

Temperatur	Quarz	Oszillator
–40 °C	–160 ppm	+4 ppm
+25 °C	0 ppm	–2 ppm
+85 °C	–140 ppm	+7 ppm

Aus der Tabelle links ist ersichtlich, dass ein alternativer Quarzoszillator mit einem Stromverbrauch von nur 1 μ A über Temperatur- und Versorgungsspannungsbereich eine deutlich geringere Frequenzabweichung aufweist als ein herkömmlicher Uhrenquarz und daher für bestimmte Anwendungen die bessere Wahl sein kann.



Erst kürzlich wurden neue 32.768-kHz-Alternativen zu den etablierten Stimmgabelquarzen und klassischen Oszillatoren vorgestellt:

- Der **GEYER KX-327ZT** überzeugt mit seinen kompakten Abmessungen von nur 1.0 x 0.8 x 0.4 mm und erweitert die GEYER-Uhrenquarz-Familie. Er ist ideal für kleine Geräte wie GPS-Tracker, Smartwatches oder Kommunikationsgeräte.
- Der **ultra-stromsparende GEYER TCXO KXO-89@32.768 kHz** bietet eine besonders stabile Frequenz bei minimalem Stromverbrauch und ist damit die perfekte Wahl für Smart Meter, Sensoren, batteriebetriebene Geräte mit langer Lebensdauer sowie Wearables.

Fazit

Uhrenquarze finden in einer Vielzahl von Anwendungen Verwendung: in Zeitmessgeräten (z. B. RTCs) oder in energiearmen Anwendungen (z. B. Standby-Takt von Controllern) – manchmal sogar in beiden Bereichen gleichzeitig (z. B. bei Zählern). Häufig kommen sie auch dort zum Einsatz, wo Kosten eine Rolle spielen (z. B. Spielzeuge oder Gadgets).

Die Auslegung mit Uhrenquarzen ist nicht trivial und erfordert mehr als die wenigen Hinweise, die in diesem Beitrag gegeben werden.

Bei richtiger Auswahl, gegebenenfalls mit Temperaturkompensation und regelmäßiger Master-Uhr-Synchronisation sowie solider ingenieurmäßiger Begleitung **„ticken“** die Quarze selbst im erweiterten Temperaturbereich zuverlässig.

Intelligente Alternativen zu Uhrenquarzen bieten zudem, wo erforderlich, ein zusätzliches Maß an Präzision und Stabilität.