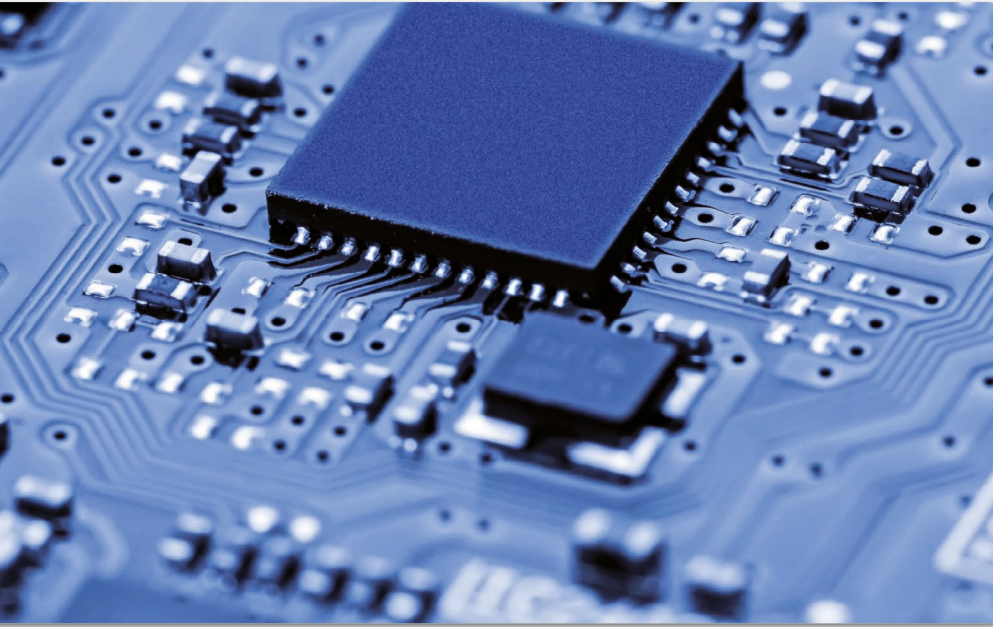


Praxisleitfaden

Quarze optimal auf ICs abstimmen

Damit ein Quarzoszillator (Schwingquarz in der Oszillatorstufe eines ICs) stabil, präzise und zuverlässig schwingt, muss der eingesetzte Quarz optimal auf die Anforderungen des jeweiligen ICs abgestimmt werden.



Quarz-CL	C1/C2-Startwert
6 pF	12–15 pF
8 pF	15–18 pF
12.5 pF	18–20 pF

Tabelle 1: Richtwerte für Lastkapazitäten

Typische Richtwerte in Tabelle 1. Eine präzise Anpassung erfolgt oft über Messungen oder Herstellerempfehlungen. Rechenbeispiel: Mit welchen externen Kapazitäten muss ich einen $C_L = 12$ pF Quarz beschalten? Basierend auf obiger Formel wird gerechnet: 182 geteilt durch 36 plus 2 pF ($C_{\text{parasitär}}$) = 18 pF (C_{X1} und C_{X2} sollen je 18 pF to GND betragen).

Die In-Circuit-Messungen von unseren Schwingquarzen in Kundensaltungen zeigten als sehr verlässlichen Durchschnittsparameter eine Streukapazität von 2 pF auf, sodass wir diesen Durchschnittswert zur Berechnung der externen Beschaltungskapazitäten verwenden. Es gibt aber auch IC-Hersteller, die in ihren Datenblättern eine kapazitive Belastung von XIN/XOUT von bis zu 7 pF beschreiben. Daher ist es wichtig, vor der Berechnung der Schaltungskapazitäten für den Schwingquarz nochmals im Datenblatt nachzulesen, welche kapazitive Belastung ggf. für XIN/XOUT vorgegeben sind.

Soll der Schwingquarz in einer Applikation mit höherer Langzeitgenauigkeit verwendet werden, z.B. in Wireless-Applikation fürs ISM-Band, dann empfehlen wir die Verwendung von Beschaltungskapazitäten mit 1% Toleranz.

Drive-Level und Verlustleistung

Der Drive-Level (typisch $1...200$ μ W) gibt an, wieviel Leistung der Quarz dauerhaft verträgt. Zu hoher Drive-Level führt zu:

- erhöhter Alterung und Drift
- Veränderung der Frequenzstabilität
- Erhöhung des Serienresonanzwiderstandes
- Fehlausfällen durch Risse im Quarzplättchen

Zu niedriger Drive-Level verursacht unzuverlässiges Starten und erhöhte Jitterwerte.

Entscheidend sind dabei die Werte der externen Beschaltungskapazitäten, Anschwingbedingungen, Drive-Level (Quarzstrom) sowie Layout-Faktoren auf der Leiterplatte. Dieser Beitrag erklärt kompakt und praxisorientiert, wie die korrekte Abstimmung eines Quarztaktgebers gelingt und welche Fehler in der Praxis besonders häufig auftreten.

Warum Quarze und ICs aufeinander abgestimmt werden müssen

Quarze sind frequenzbestimmende Komponenten, deren Genauigkeit stark von ihrer elektrischen Umgebung abhängt. Mikrocontroller-Hersteller spezifizieren typischerweise:

- erforderliche Lastkapazität (C_L)
- zulässiger Drive-Level
- benötigte Startzeit
- Oszillatortopologie und interne Verstärkung

Nur wenn diese Parameter zum Quarz passen, arbeitet der Oszillator innerhalb seiner Toleranzen und erfüllt Timing-Anforderungen, wie z.B. Wireless, USB, CAN, Ethernet, UART-Baudraten etc.

Die Rolle der Lastkapazität

Die Lastkapazität definiert den Arbeitspunkt der Schwingfrequenz. Jeder Quarz wird auf eine bestimmte C_L getrimmt (z.B. $8, 12, 16$ pF). Die effektive Lastkapazität ergibt sich aus:

$$C_{L,\text{eff}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + C_{\text{parasitär}}$$

Typische parasitäre Kapazitäten:

- IC-Pin: $1...3$ pF
- Leiterbahnen: $0,5...2$ pF
- Löt pads: $0,5...1$ pF

Wird C_L zu klein gewählt: Frequenz steigt, Timingfehler möglich

Wird C_L zu groß gewählt: Frequenz sinkt und Oszillator kann schlecht starten

Dimensionierung der externen Kapazitäten

Die externen Kapazitäten C_1 und C_2 werden so gewählt, dass gilt:

$$\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \approx C_L - C_{\text{parasitär}}$$

Oszillator-ICs geben meist den typischen und maximalen Drive-Level an; eine Messung ist empfehlenswert.

Da die Quarzresonator-Designs für die von uns lieferbaren SMD-Quarze selber entwickelt werden, können wir auch in kleinen Keramikgehäusen MHz-Schwingquarze mit hoher Drive-Level-Festigkeit liefern: den Low-ESR-Mini-Quarz der Serie SMD03025/4 bis 500 μ W bzw. den Ultra-Miniature-MHz-Quarz der Serie SMD02016/4 bis 400 μ W. Für die anderen Micro-SMD-Schwingquarze der Serien SMD01612/4 und SMD01210/4 beträgt der Drive-Level bemerkenswerte 200 μ W. Der marktübliche Standard beträgt 10 μ W typ./50 μ W max. bzw. 100 μ W max.

Start-Up-Time (Hochlaufzeit)

Diese Zeit hängt ab von:

- Verstärkung des Oszillators im IC
- Quarz-ESR (Equivalent Series Resistance)
- Lastkapazität des Schwingquarzes
- Werte der externen Beschaltungskapazitäten
- Temperatur und Versorgungsspannung

Zu große C_L -Werte verlängern die Start-up-Zeit oft erheblich – problematisch bei Low-Power-MCUs mit Sleep-Zyklen.

ESR – ein unterschätzter Parameter

Der ESR beeinflusst:

- Anschlagverhalten und Anschwingsicherheit
- Energieverbrauch
- Anschlagverhalten bei niedrigen Quarzströmen

Viele ICs spezifizieren einen maximalen ESR (z. B. 70 Ohm). Liegt der Quarz darüber, kann der Oszillator nicht sicher starten.

Warum besitzen Oszillatorstufen einen negativen Eingangswiderstand?

In kapazitiven Pierce-Oszillatoren – der mit Abstand meistgenutzten Topologie in Mikrocontrollern – arbeitet der interne Inverter des ICs in einem analogen Arbeitsbereich, in dem er sich wie ein Verstärker mit negativer Impedanz verhält. Dieser negative Eingangswiderstand ist gewollt und sorgt dafür, dass:

- der Quarz Energie aus der Oszillatorschaltung erhält
- Verluste im Quarz (ESR) kompensiert werden

- die Schwingung selbstständig anwächst und stabil wird

Vereinfacht gilt als Startbedingung:

$$|R_{\text{neg}}| > R_{\text{ESR}}$$

Das bedeutet: Der Betrag des negativen Eingangswiderstands muss größer sein als der Serienwiderstand (ESR) des Quarzes. Nur dann entsteht eine Nettoverstärkung, die zum Anschwingen führt. Für das sichere Anschwingen eines Schwingquarzes in der Oszillatorstufe ist ein SF >5 (Safety Factor) als Mindestanforderung zu betrachten. In Automotive-Applikationen muss der SF sogar >10 betragen. Ist der Betrag des negativen Eingangswiderstands zu klein, passiert Folgendes:

- Der Quarz erhält zu wenig Energie: langsames oder gar kein Anschwingen
- Die Oszillation setzt erst bei höherer Versorgungsspannung oder Temperatur ein.
- Das Start-up in Low-Power-Betriebsarten wird unzuverlässig.

Typische Ursache: Einige moderne MCUs haben aus Effizienzgründen schwache Oszillatorverstärker, wodurch der Betrag von R_{neg} kleiner ist als bei älteren IC-Generationen. Gleichzeitig arbeiten viele Designs mit kleinen Lastkapazitäten oder langen Leiterbahnen, was parasitäre Verluste erhöht.

Warum sind Quarze mit niedrigem ESR besonders wichtig?

Der ESR des Quarzes definiert seine inneren Verluste. Ein niedriger ESR bedeutet:

- geringe Verluste
- geringere notwendige Gegenverstärkung
- hohe Anschwingsicherheit auch bei schwachen Oszillatorstufen
- geringe Startzeit
- stabiles Schwingen über der Temperatur

Praktische Empfehlungen: Verwenden Sie Quarze, deren ESR deutlich unter dem vom IC spezifizierten Maximalwert liegt. Wenn ein Mikrocontroller z.B. max. 70 Ohm vorgibt, ist ein Quarz mit 30...50 Ohm ideal. Damit bleibt ausreichend Sicherheitsmarge gegenüber einem möglicherweise niedrigen negativen Eingangswiderstand des Oszillators.

Um hier mit entsprechend innovativer Technologie die Kunden entsprechend unterstützen zu können, verfügen unsere Schwingquarze über die exklusive LRT-Technologie (Low ESR Resonator Technology).

Fazit zum Zusammenspiel von R_{neg} und Quarz-ESR

Die Anschwingsicherheit hängt wesentlich davon ab, ob:

- der interne Oszillator genügend negativen Eingangswiderstand liefert
- der Quarz einen ausreichend niedrigen ESR aufweist
- die Lastkapazitäten korrekt dimensioniert sind

Nur bei korrektem Verhältnis von R_{neg} zu ESR startet der Quarz schnell, zuverlässig und über den gesamten Temperatur- und Spannungshub hinweg.

Layout-Empfehlungen

Für Quarze gilt:

- Quarz + Kondensatoren möglichst nah am IC platzieren
- kurze, symmetrische Leiterbahnen
- keine Signale oder Masseflächen direkt unter dem Quarz (verringert parasitäre Kapazitäten und entsprechende Einstreuungen)
- dedizierte GND-Insel für die Kondensatoren
- wenn möglich, den Quarz auf GND legen

Bei unseren SMD-Schwingquarzen im Keramikgehäuse können die Pads #2 und #4 auf GND gelegt werden. Aber bitte den Quarz sofort auf GND legen und für die Frequenzabstimmung in der Schaltung nicht mehr ändern.

Diese Maßnahmen verbessern EMV, Jitter und Startverhalten.

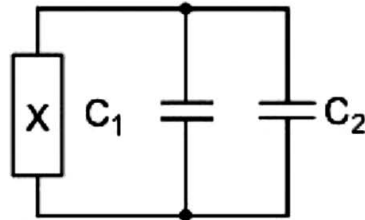
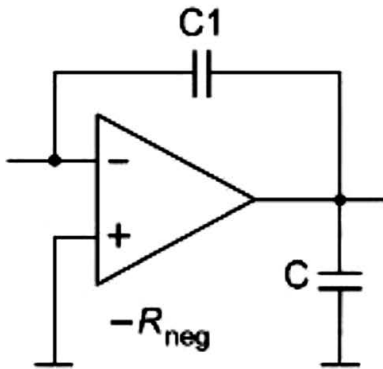
Häufige Fehler in der Praxis

- falsche C_L -Wahl (Frequenzfehler)
- Quarz mit zu hohem ESR (startet nicht zuverlässig)
- Drive-Level überschritten (Quarz driftet stark)
- schlechtes Layout (instabile Oszillation)
- parasitäre Kapazitäten (Beschaltung falsch)

Fazit

Die optimale Abstimmung eines Quarzes auf ein IC ist entscheidend für die Zuverlässigkeit des Oszillators und den langfristigen Betrieb des Quarzresonators in der Schaltung (Drive-Level-Anpassung). Mit korrekter Lastkapazität, richtigem Drive-Level, geeignetem ESR und einem guten Layout können Entwickler stabile Frequenzreferenzen sicherstellen.

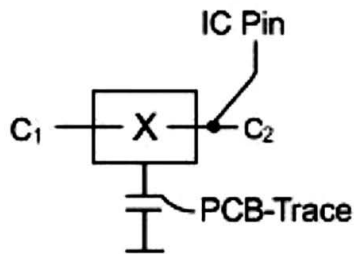
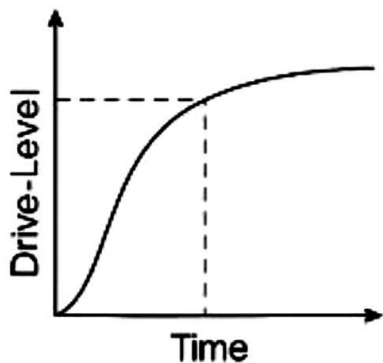
Technische Erläuterung der Oszillator-Diagramme



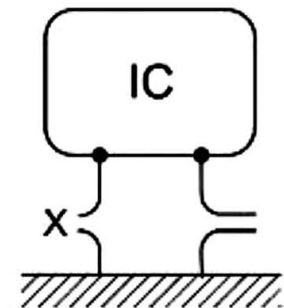
Loadcapazität

$$|R_{\text{neg}}| > R_{\text{ESR}}$$

Startup-Condition



Parasitiscapazerenen



Layout Guidelines

Die dargestellten Diagramme beschreiben die physikalischen und elektrischen Mechanismen, die das Start- und Betriebsverhalten eines quarzstabilisierten Pierce-Oszillators bestimmen. Im Fokus stehen insbesondere:

- der negative Eingangswiderstand der Oszillatorstufe
- das Verlustmodell des Quarzes (ESR)
- die Startbedingung gemäß Barkhausen-Kriterium
- der zeitliche Aufbau des Drive-Levels
- parasitäre Kapazitäten
- layout-bedingte Einflussfaktoren

Diese Parameter sind entscheidend für Anschwingsicherheitsreserve, Anschwingzeit, Frequenzgenauigkeit, Jitter und Langzeitstabilität.

Pierce-Oszillator und negativer Eingangswiderstand (linke obere Darstellung)

Diese Grafik zeigt die klassische Pierce-Oszillatorschaltung, wie sie in den meisten Mikrocontrollern und ASICs integriert ist. Der Pierce-Oszillator basiert auf einem

invertierenden Verstärker, der durch Rückkopplung über den Quarz in den linearen Betrieb gezwungen wird. In diesem Arbeitspunkt lässt sich die Eingangsstufe durch ein Kleinsignal-Ersatzmodell mit negativem Realteil der Impedanz beschreiben.

Dabei gilt:

$$Z_{\text{in}} = R_{\text{neg}} + jX \text{ mit } R_{\text{neg}} < 0$$

Dieser negative Widerstand bedeutet gewissermaßen eine aktive Energiequelle, die die im Quarz entstehenden Verluste kompensiert. Wichtige Eigenschaften und technische Bedeutung von R_{neg} :

- abhängig von Versorgungsspannung, Temperatur und Prozessstreuung
- stark beeinflusst durch interne Bias-Netzwerke
- in Low-Power-Designs bewusst reduziert
- Der interne Inverter des ICs arbeitet im linearen Bereich und verhält sich wie ein negativer Widerstand.
- Nur wenn genügend negative Impedanz vorhanden ist, kann die Schwingung anwachsen.

Kernaussage: Die Oszillatorstufe liefert Energie – der Quarz bestimmt die Frequenz.

Lastkapazitätsmodell des Quarzes (obere mittlere Darstellung)

Diese Darstellung zeigt den Quarz mit den beiden externen Beschaltungskondensatoren. Er lässt sich durch ein Serien-RLC-Glied (R_1, L_1, C_1) mit einer parallelen Gehäusekapazität C_0 beschreiben. Der ESR repräsentiert die mechanischen Verluste des Schwingungssystems. Die externe Beschaltung mit den beiden Kondensatoren definiert die effektive Lastkapazität:

$$C_{L,\text{eff}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + C_{\text{parasitär}}$$

Abweichungen vom spezifizierten C_L führen zu:

- systematischem Frequenzversatz
- verändertem Phasenwinkel im Regelkreis
- reduzierter negativer Widerstandsreserve

Technische Bedeutung:

- Die effektive Lastkapazität bestimmt die tatsächliche Arbeitsfrequenz des Quarzes. Die beiden externen Kapazitäten wirken seriell, zusätzlich kommen parasitäre Kapazitäten hinzu. Der Quarz ist immer auf eine definierte Lastkapazität spezifiziert (z.B. 8 oder 12 pF).

Kernaussage: Falsche Lastkapazität führt zu Frequenzabweichungen und schlechterem Anschwingverhalten.

Anschwingbedingung und negative Widerstandsreserve (obere rechte Darstellung)

Start-up-Condition:

$$|R_{\text{neg}}| > R_{\text{esr}}$$

Die notwendige Startbedingung ergibt sich aus dem Barkhausen-Kriterium:

- Schleifenverstärkung > 1
- Phasenverschiebung = 0° (bzw. 360°)

Im Impedanzmodell reduziert sich dies auf:

$$|R_{\text{neg}}| > R_{\text{ESR}}$$

Für robuste Designs wird eine Sicherheitsreserve empfohlen:

$$|R_{\text{neg}}| \geq 5 \times R_{\text{ESR}}$$

In Automotive-Applikationen wird folgendes gefordert:

$$|R_{\text{neg}}| \geq 10 \times R_{\text{ESR}}$$

Konsequenzen unzureichender Reserve:

- verlängerte, instabile Startzeit
- temperaturabhängiges Nicht-Anschwingen
- Startprobleme bei niedriger Versorgungsspannung

Diese einfache Ungleichung beschreibt die fundamentalen Anschwingbedingung. Technische Bedeutung:

- Der Betrag des negativen Eingangswiderstands muss größer sein als der ESR des Quarzes.
- Andernfalls schwingt der Quarz nicht oder nur unzuverlässig an.
- Moderne Low-Power-MCUs arbeiten oft mit einem kleineren Wert als ältere Designs.

Kernaussage: Quarze mit niedrigem ESR sind entscheidend für sicheres Anschwingen in der Oszillatorstufe.

Alle von Petermann gelieferten Schwingquarze verfügen über die exklusive LRT-Technologie. Diese innovativen LRT-Schwingquarze haben design-bedingt sehr niedrige ESR-Werte (bei $+25^\circ\text{C}$ und über den entsprechend spezifizierten Temperaturbereich), sodass sie dem Schaltungs-Designer sehr viel Anschwingreserve bieten und jederzeit unter allen Umständen sehr schnell und sehr sicher in der Schaltung anschwingen.

Zeitlicher Aufbau des Drive-Levels (untere linke Darstellung)

Diese Kurve zeigt den zeitlichen Aufbau der Schwingamplitude nach dem Einschalten. Nach dem Einschalten beginnt der Oszillator im Rauschbereich. Die Schwingamplitude wächst exponentiell gemäß:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{t/\tau}$$

Wobei die Zeitkonstante durch die Differenz zwischen negativer Verstärkung und Verlusten bestimmt wird. Drive-Level-Grenzen:

- oberer Grenzwert durch mechanische Belastbarkeit des Quarzes
- unterer Grenzwert durch notwendige Energiezufuhr zur Stabilisierung

Ein zu hoher Drive-Level beschleunigt Alterung und Drift, ein zu niedriger verschlechtert Jitter und Startverhalten. Technische Bedeutung:

- Zu Beginn ist die Schwingung sehr klein und wächst exponentiell an.
- Der stationäre Drive-Level ergibt sich aus dem Gleichgewicht zwischen Verstärkung und Verlusten.
- Zu hoher Drive-Level kann den Quarz schädigen, zu niedriger Drive-Level erschwert das Starten.

Kernaussage: Ein korrekt dimensionierter Oszillator startet schnell und betreibt den Quarz im zulässigen Leistungsbereich.

Parasitäre Kapazitäten und deren Auswirkungen (untere mittlere Darstellung)

Parasitische Kapazitäten entstehen durch:

- IC-Pins (typ. 1...3 pF)
- Leiterbahnen (ca. 0,5... 2 pF)
- Löt pads und Gehäuse

Diese Kapazitäten erhöhen die effektive Lastkapazität, reduzieren den Betrag von R_{neg} und verschieben den Arbeitspunkt. Besonders kritisch sind Designs mit niedriger spezifizierter C_L , da parasitäre Effekte dort prozentual stark wirken. Meistens werden in batteriebetriebenen Applikationen von den entsprechenden IC-Herstellern

SMD-Quarze mit niedrigen Lastkapazitäten vorgegeben. Ein MHz-Quarz hat typ. 8 pF, ein 32,768-kHz-Quarz bis 4 pF. In solchen Applikationen ist es ratsam, eine Toleranz von 1% für die externen Beschaltungskapazitäten zu wählen. Damit können parasitäre Einflüsse auf die Arbeitsfrequenz des Quarzes stark reduziert werden. Technische Bedeutung:

- Parasitische Kapazitäten erhöhen die effektive Lastkapazität.
- Sie beeinflussen Quarzfrequenz, Anschwingzeit und -sicherheit, sowie negative Widerstandsreserve.
- Besonders bei niedrigen C_L -Quarzen (< 10 pF) sind sie kritisch.

Kernaussage: Parasitäre Kapazitäten müssen bei der Dimensionierung der Lastkondensatoren/externen Beschaltungskapazitäten immer berücksichtigt werden.

Layout-Einfluss auf Oszillatorstabilität (untere rechte Darstellung)

Diese schematische Darstellung zeigt empfohlene Layout-Prinzipien. Das Leiterplatten-Layout beeinflusst das Quarzverhalten in der Schaltung stärker als häufig angenommen. Technische Bedeutung:

- Quarz und Lastkondensatoren sehr nah an das IC bringen
- kurze, symmetrische Leiterbahnen
- keine Signale oder Masseflächen unter dem Quarz
- dezidierte, saubere Masseführung

Kernaussage: Ein schlechtes Layout kann selbst einen optimal ausgewählten Quarz unbrauchbar machen.

Zusammenfassung

Die Funktion eines Quarzoszillators hängt nicht nur vom Quarz selbst, sondern auch vom Zusammenspiel aus IC-Oszillator, ESR, Lastkapazität, parasitären Effekten und Layout ab. Für ein robustes Oszillator-Design müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Quarz mit niedrigem ESR (stellt ausreichende negative Widerstandsreserve sicher)
- Lastkapazitäten realistisch berechnen
- Layout konsequent optimieren

Kernaussage: Der Quarz sollte nicht nur die IC-Spezifikation erfüllen, sondern deutlich darunter liegen, um Prozess-, Temperatur- und Alterungseinflüsse sicher zu kompensieren. ◀