

Oszillatorschaltungs-Design (nicht nur) für Mikrocontroller

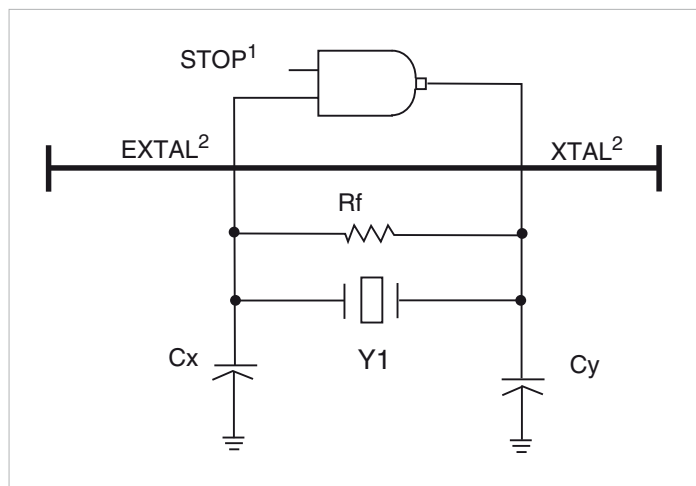


Bild 1: Pierce-Oszillator an einem Mikrocontroller M68HC11 (STOP ist ein intern erzeugtes Signal, das die Oszillatorschaltung deaktiviert)

Dieser Artikel soll einen systematischen Ansatz für ein gutes Oszillator-Design liefern und auf einige Tücken hinweisen.

Der Herzschlag jedes Mikrocontroller-Designs ist der Oszillatortakt. Die meisten Designs verlangen ein präzises Timing über einen weiten Temperaturbereich. Schaltungs- und Leiterplattenentwickler haben die Aufgabe, die Mikrocontroller-Funktionen ohne die Bemühung von Paarungsspezifikationen zu gewährleisten.

Von der Theorie in die Praxis

Die in Bild 1 gezeigte Pierce-Oszillatorschaltung wird bei den meisten Mikrocontrollern verwendet. Diese Schaltung

besteht aus einem invertierenden Verstärker und einem selektiven Rückkopplungspfad mit dem Quarz. Dieser bildet in Kombination mit C_x und C_y ein abgestimmtes Pi-Netzwerk. Im eingeschwingenen Zustand hat diese Schaltung eine Gesamtschleifenverstärkung von 1 und eine Gesamtphasenverschiebung, die ein ganzzahliges Vielfaches von 360° ist. Für das Einschwingen muss die Schleifenverstärkung größer als 1 sein, während die Spannung an XTAL über mehrere Zyklen ansteigt, bis der NAND-Gate-Verstärker gesättigt ist. Auf den ersten Blick scheint ein digitales NAND-Gatter als analoger Verstärker nicht logisch, aber so funktioniert eine Oszillatorschaltung. Wie zu erwarten, ist eine erhebliche Menge an Leistung erforderlich ist, um einen Verstärker in einem linearen Modus zu halten.

Das übliche Modell eines Quarzes ist ein Netzwerk aus zwei Kondensatoren, einer Induktivität und einem Widerstand, wie in Bild 2 im oberen Teil dargestellt. Die Nebenschlusskapazität C_0 entsteht durch die Metallplatten für die elektrischen Verbindungen. Quarze können aber bei mehreren Frequenzen schwingen (Obertöne). Für jeden Oberton wird dem Modell eine Serien-RLC-Kombination hinzugefügt

(Bild 2 unten). Bei der Nennbetriebsfrequenz ist die Impedanz eines Quarzes induktiv. Wie in Bild 3 gezeigt, ist die Reaktanz des Quarzes bis zu einer Serienresonanzfrequenz f_s und darüber hinaus kapazitiv. Bei der Resonanzfrequenz f_a ist die Reaktanz ebenfalls kapazitiv. Dies bedeutet, dass die Schwingungsfrequenz begrenzt wird durch f_s und f_a . Die genaue stationäre Frequenz wird durch die Verstärkung des Verstärkers und die Last bestimmt.

Lastkondensatoren (C_x und C_y) werden verwendet, um einen abgestimmten LC-Tankkreis in Resonanz zu bilden. Die kombinierte Impedanz von C_x und C_y und anderer Streukapazität entspricht der induktiven Reaktanz des Kristalls. Die Betriebsfrequenz kann abgeschätzt werden mit folgender Formel:

$$f \approx 1/[2\pi\sqrt{(L_1 \times C_L)}]$$

In vielen Fällen schwingt die Spannung an EXTAL und XTAL übrigens außerhalb des Bereichs der Betriebsspannung. Durch Ändern der Kapazitätswerte wird die Betriebsfrequenz nur geringfügig geändert, jedoch die Spannung bei EXTAL und XTAL kann sich signifikant ändern. Es ist also auch deswegen wichtig, diese Elemente richtig zu dimensionieren und Qualitätsausführungen zu verwenden: Kondensatoren mit langer Lebensdauer,

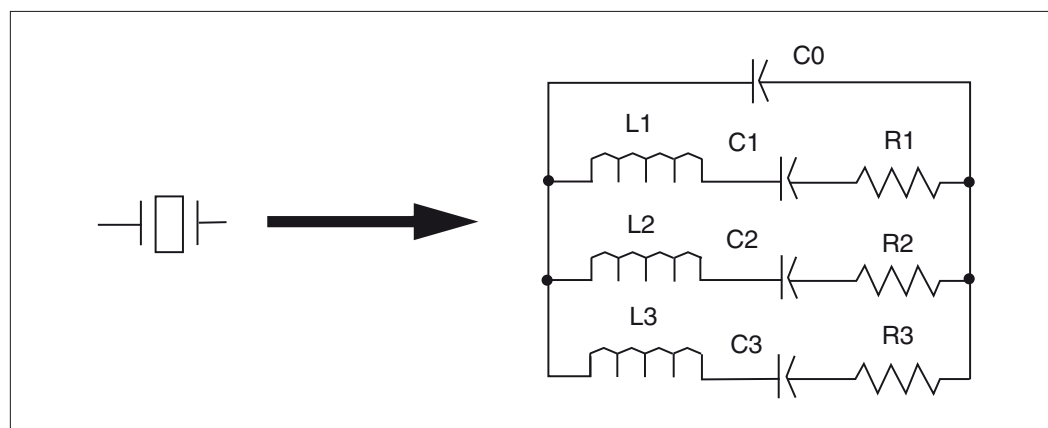


Bild 2: Quarz-Ersatzschaltbild; L1, C1 und R1 repräsentieren die Grundfrequenz, L2, C2, R2, L3, C3 und R3 die Obertöne

Quelle:
Cathy Cox und Clay Merritt:
Microcontroller Oscillator
Circuit Design Considerations,
AN1706/D,
Freescale Semiconductor, Inc.,
www.freescale.com
übersetzt und gekürzt von FS

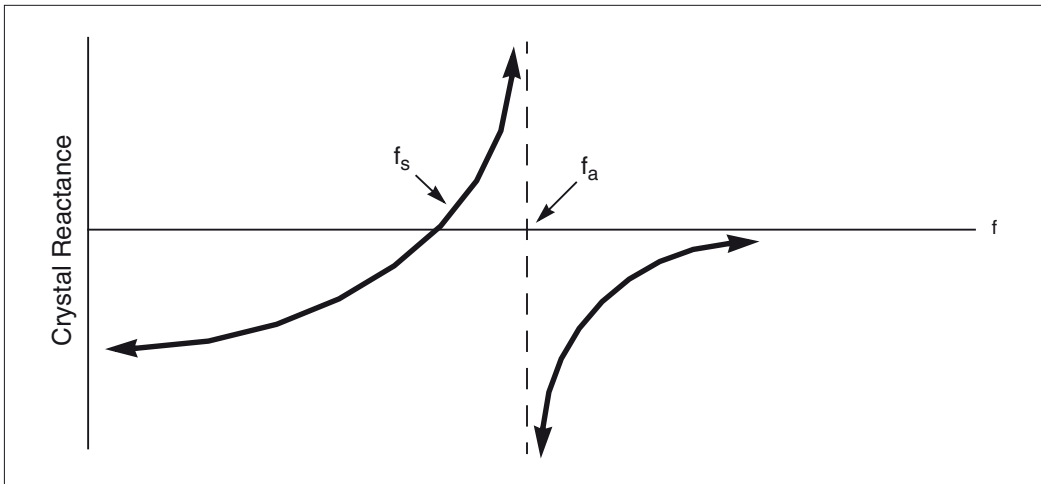


Bild 3: Reaktanzverlauf eines Quarzes über der Frequenz (f_s = Serienresonanzfrequenz, f_a = Antiresonanzfrequenz)

sehr niedrigem ESR und guter Temperaturstabilität.

Die mathematische Demonstration des Starts einer Oszillatorschaltung ist aufgrund nichtlinearer Eigenschaften des Systems wie Verstärkung und Quarzimpedanz sehr schwierig. Eine umfassende Analyse eines MCU-Designs wird normalerweise nicht durchgeführt. Ein externes Element muss effektiv mit der Schwingung beginnen, indem eine zeitvariable Spannung über dem Kristall erscheint. Dies kann auch durch Einspeisung von Stromversorgungsrauschen erfolgen.

Der Rückkopplungswiderstand R_f dient dazu, den Eingang des NAND-Gatters auf halber Betriebsspannung vorgespannt zu halten. R_f muss so dimensioniert sein, dass eine angemessene Rückkopplung möglich ist, ohne dass die Schaltung übermäßig belastet wird. Hersteller von Mikrocontrollern schlagen normalerweise einen Bereich akzeptabler Werte vor, normalerweise zwischen 100 kOhm und 22 MOhm. Für Niederfrequenzschaltungen ist die Kristallimpedanz relativ hoch und der Wert für R_f muss auch hoch sein (10 MOhm für 32 kHz). Für höhere Frequenzen muss R_f niedriger sein (100 kOhm für 10...20 MHz).

Die Spannungen bei EXTAL und XTAL sind normalerweise verzerrte Sinuswellen, die ungefähr 180° phasenverschoben sind.

Diese Sinuswellen schwingen symmetrisch um die halbe Versorgungsspannung. Das NAND-Gate gerät in die Sättigung, daher die Verzerrungen. Die Aufmachergrafik zeigt typische Wellenformen bei XTAL (unten) und EXTAL (Frequenz = 4 MHz, Mikroprozessor = M68HC11E9). Beachten Sie die Amplituden- und Phasendifferenzen.

Der STOP-Pin des NAND-Gatters in Bild 1 wird von der CPU aktiviert, um den Oszillator für Ultra-Low-Power-Betrieb zu deaktivieren. Im Normalbetrieb wirkt das NAND-Gatter als kleiner signalinvertierender Verstärker, der im linearen Modus arbeitet (aber selbst nicht perfekt linear ist). Für die digitale Analyse wird das Gatter wie in Bild 4 gezeigt modelliert und dabei, um die Funktionsweise der Oszillatorschaltung vollständig zu verstehen, die Kleinsignal-Ersatzschaltung nach Bild 5 verwendet.

Das Modell muss wie in Bild 6 dargestellt analysiert werden, a) digitale Darstellung, b) Kleinsignaldarstellung.

Damit die Oszillatorschaltung stabil schwingt, muss die absolute Verstärkung des Verstärkers 1 sein. Im eingeschwingenen Zustand muss die Schleifenverstärkung 1 sein. Die richtige Wahl von C_x und C_y ist für den Start des Oszillators und die stationäre Verhältnisse von größter Bedeutung. Normalerweise wird C_x gleich oder etwas kleiner als C_y gewählt, in die Praxis führt Tabelle 1 anhand eines typischen 4,9-MHz-Quarzes in einer M68HC11-Treiberschaltung an 5 V.

Verstärkung und Drive Level

Auch die Verstärkung ist kritisch beim Starten eines Oszillators. Sie muss groß genug sein, um das Netzwerk „anzutreiben“, aber wenn sie zu groß ist, kann es schädliche Auswirkungen

haben wie übermäßigen Stromverbrauch, hohe HF-Emissionen und am schlimmsten einen Oszillator, der nicht startet. Es ist nicht einfach, einen Verstärker für den Oszillatorbetrieb von 1 bis 10 MHz zu optimieren, während das Rauschen und der Stromverbrauch auf einem Minimum bleiben.

Ein ziemlich einfaches Experiment kann durchgeführt werden, um die tatsächliche Verstärkung zu bestimmen. Ziehen Sie den EXTAL-Stift von der Leiterplatte und speisen Sie kapazitiv eine Sinuswelle mit 25...50 mV Spitze-Spitze mit der Nennfrequenz an EXTAL ein. Messen Sie den Spannungspegel am XTAL-Pin, wenn die Platine und die eingesetzten Komponenten mit Strom versorgt werden. Das Verhältnis U_{out}/U_{in} ergibt die Verstärkung des internen Verstärkers. Wenn sie unter 1,5 liegt, ist dies eher gut als schlecht.

Das Übersteuern über einen längeren Zeitraum kann einen Quarz physisch beschädigen. Typische Betriebsleistungen für Quarze (Drive Levels) liegen zwischen 1 μ W (für kleine 32-kHz-Stimmgabelquarze) bis 5 mW (für HF-Quarze mit einem kreisförmigen AT-Schnitt).

Einfluss parasitärer Effekte verstehen

Die parasitäre kapazitive Kopplung und die Induktivität von Leiterzügen auf Leiterplatten beeinflussen Schwingfrequenz und Oszillatorspannung. Wenn PCB- und Halbleiter-Geometrien immer kleiner werden, wird besonders das Verständnis und die Kontrolle von kapazi-

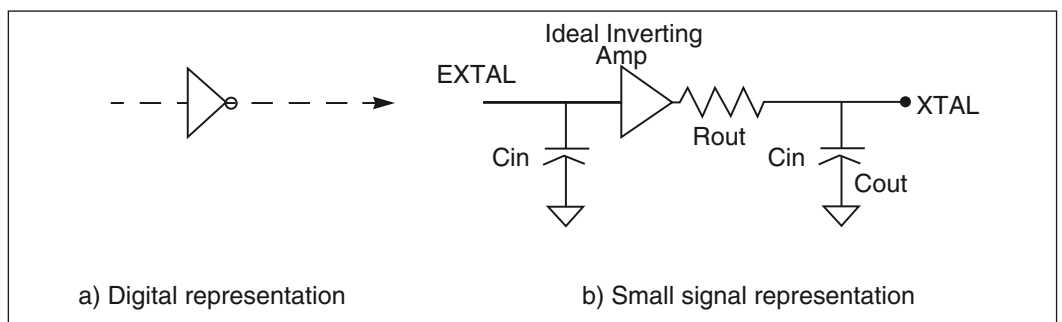


Bild 4: Modell des CMOS Logic Gates

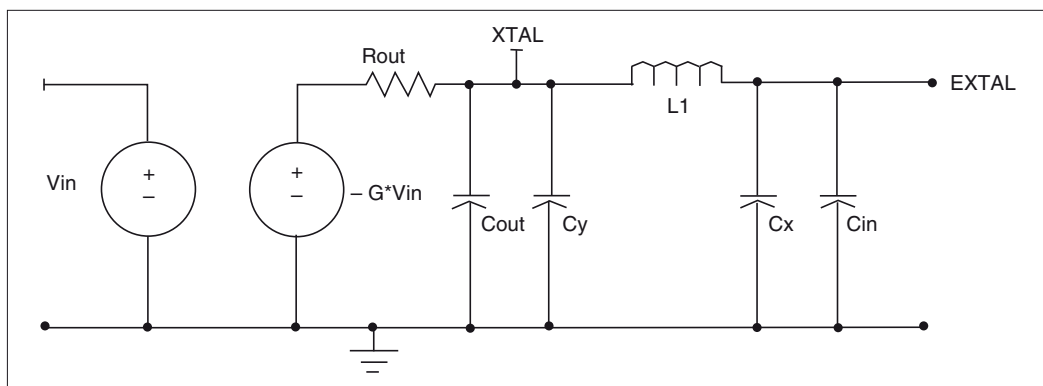


Bild 5: Kleinsignalmodell des invertierenden Verstärkers und der Quarzschialtung ($G = \text{Open-Loop-Verstärkung des Verstärkers}$)

tiver Kopplung wichtiger. Stellen Sie sich eine Spur von 10 mm Länge und 1 mm Breite vor, die direkt über einer festen Grundebene verläuft. Das Board ist ein zweischichtiger FR4-Typ mit einem Abstand zwischen den Kupferschichten von 0,31 mm. Bei Glasfasermaterial ergibt sich dann 1 pF. Doch mit oberflächenmontierten Bauteilen vergrößert sich durch deren Pad-Fläche die Kapazität auf z.B. 5 pF. Hybrid-Leiterplatten haben ein sehr dünnes Dielektrikum. Die Dielektrizitätskonstante kann hoch sein, was unter obigen Bedingungen z.B. 15 pF ergeben kann.

Die parasitäre Induktivität ist abhängig von der Stromschleifenfläche. Eine große Grundebene kann normalerweise die kleinste Schleifenfläche garantieren. Benutzer von Single-Layer-Boards und Two-Layer-Boards ohne Bodenebenen müssen besondere Vorkehrungen treffen, um die Oszillatorspurlänge so kurz wie möglich zu halten bei minimaler Schleifenfläche.

Es sollte auch darauf geachtet werden, dass die Stromquelle zum Mikrocontroller hin gut entkoppelt ist.

Mögliche Problembereiche

Das Erhöhen der Kapazität von beiden Anschlüssen des Kristalls zur Erde durch Streueffekte des Platinen-Layouts ist nicht schädlich, solange es bei der Auswahl der Stabilisierungskondensatoren C_x und C_y berücksich-

tigt wird. Doch wenn die Leiterbahnen für C_x und C_y übermäßig lang sind, kann dies zu einer unerwünschten Induktivität führen. Bild 6 zeigt ein Modell der Auswirkungen der Leiterplatte auf die Oszillatorschialtung. Die Induktivität ist eine Funktion der Gesamtfläche. Stellen Sie sicher, dass die Wege so kurz wie möglich sind und dass der Schleifenbereich dieses Pfades so klein wie möglich ist. C_x , C_y , R_f und der Quarz sollten also so nah wie möglich an den Oszillatorstiften des Mikrocontrollers platziert sein.

Die folgenden Probleme wurden von Freescale-Anwendungstechnikern festgestellt:

• lange Leiterbahnen

Lange Leiterbahnen und unkontrollierte kapazitive Kopplung können Probleme verursachen. Bezugnehmend auf Bild 6: Wenn L_1 oder L_2 signifikant sind, kann die Nettoimpedanz von C_x und L_x oder C_y und L_y sehr klein sein, wodurch jegliche Rückkopplungsspannung effektiv beseitigt wird. Wenn eine signifikante Kapazität vorhanden ist, kann die effektive Belastung des Verstärkers viel höher sein als angenommen und die Verstärkung möglicherweise nicht ausreichen. Dies ist wahrscheinlich das Hauptproblem. Mehrschicht- und Hybrid-Leiterplatten können eine erhebliche Kopplung mit Masse aufweisen.

• PCB-Verunreinigungen

PCB-Verunreinigungen reduzieren die Impedanz zwischen Kno-

ten durch Feuchtigkeit, Flussmittel und Fingerablagerungen. Daher sollte die Platine vollständig gereinigt werden. Achten Sie besonders darauf, die Reinheit zwischen den Quarzleitungen und unter den SMT-Bauteilen zu prüfen. Dies sind berüchtigte Orte für den Flussmittelaufbau.

• Stromversorgungsrauschen/-störungen

Das Rauschen der Stromversorgung kann manchmal durch den Verstärker des Oszillators stark verstärkt werden. Wenn die Leistung des Versorgungsrauschens eine Harmonische der Quarzfrequenz ist oder umgekehrt, dann wird der Oszillator möglicherweise nicht beginnen zu schwingen. In anderen Fällen wurde festgestellt, dass ein Rauschelement von der Stromversorgung half, die Schaltung zum Schwingen anzuregen. Ein guter Test besteht darin, die Karte auch mit einer hochwertigen Tischversorgung zu betreiben.

• kein Betrieb bei hohen Temperaturen

Der Oszillator startet möglicherweise nicht bei hohen Temperaturen. In der Regel wird dies durch übermäßiges Belasten des Verstärkers verursacht. Überprüfen Sie die richtige Dimensionierung der Stabilisierungskondensatoren C_x und C_y .

• Frequenzinstabilität

Frequenzinstabilität wird normalerweise entweder dadurch verursacht, dass der Quarz „zu hart“ oder nicht ausreichend stark betrieben wird. Meist sind

fälsch dimensionierten Stabilisierungskondensatoren die Ursache. Bei längerem Übersteuern des Quarzes kann es zu permanentem Schaden kommen.

• Hochfrequenzprobleme (>10 MHz)

Ein CMOS-Verstärker hat mit zunehmender Frequenz eine Verstärkungsdämpfung. In den meisten Mikrocontrollern liegt die Open-Loop-Verstärkung bei der Betriebsfrequenz ausreichend über 1, um eine gute Leistung zu gewährleisten. Doch das Zuführen von Hilfsmikroprozessoren oder anderen Schaltkreisen kann eine solche Last bedeuten, die den Verstärker überfordert und Schwingungen provoziert.

• Niederfrequenzprobleme (<50 kHz)

Bei niedrigen Frequenzen sind Kondensator- und Quarzimpedanz sehr hoch und häufig sind die Amplifier zu robust für einen sicheren Betrieb. Indem ein großer Widerstand in Reihe mit dem Quarz geschaltet wird, kann dessen Verlustleistung reduziert werden.

• Probleme mit dem Evaluierungs-Board

Die Einbringung eines Kabels zum Verbinden einer Entwicklungsplattform mit einem Zielsystem kann die Schaltungsparameter erheblich ändern. In den meisten Anwendungen ist es besser, die Oszillatorschialtung für die Auswertung zu verwenden, um die unerwünschten Effekte eines langen Kabels zu beseitigen, das zur Zielplatine führt.

• Hochspannungsstörungen

Hochspannungsleitungen, rotierende elektrische Maschinen oder das Ein- und Ausschalten von hohem Strom in der Nähe der Oszillatorschialtung können deren Funktion erheblich stören. Ein einziger Fehler kann dazu führen, dass die Adresse oder der Datenbus falsch gelesen wird und Software-Verwirrung kann auftreten. Unter bestimmten Umständen kann insbesondere ein elektrisches Störfeld in den relativ hochohmigen Oszillator eingekoppelt werden. Dies kann

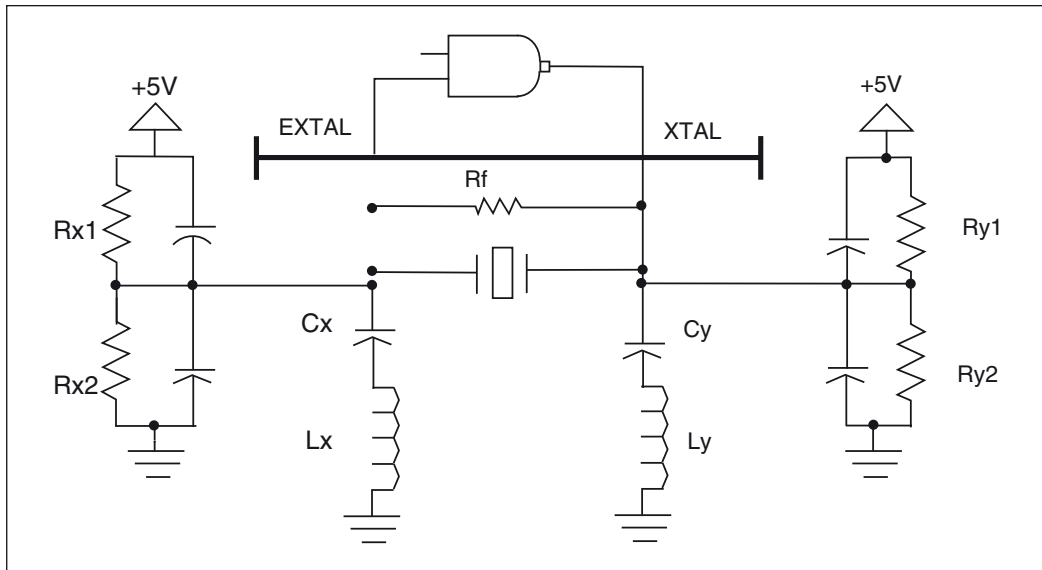


Bild 6: Modellierung von PCB-Effekten auf die Oszillatorschaltung

manchmal von der Software des Mikroprozessors als Taktimpuls interpretiert werden.

• Unterschiede zwischen EPROM und ROM

Manchmal funktionieren EPROM-Geräte ordnungsgemäß, ROM-Geräte jedoch nicht. In solchen Fällen haben das EPROM- und das ROM-Device meist unterschiedliche Geometrien. In den meisten Fällen wird eine Größenänderung der Stabilisierungskondensatoren dieses Problem beheben. Durch Verringern des Wertes von C_x bei konstantem C_L wird die Spannung bei EXTAL erhöht.

• Quarz-/Resonatorschaden

In seltenen Fällen kann die hermetische Versiegelung der Quarzleitungen gebrochen sein. Dies kann Feuchtigkeit oder andere Verunreinigungen infiltrieren und sporadische Operation verursachen. In Anwendungen, wo die Leiterplatte Vibrationen ausgesetzt ist, wird dringend empfohlen, möglichst kleine Quarze auf die Platte zu kleben. Dies begrenzt die Belastung und Dehnung, die auf den Quarz ausgeübt wird.

Testen und Fehlerbehebung

Die Oszillatorschaltung ist von Natur aus ein sehr hochohmiges Rückkopplungssystem

mit geschlossenem Regelkreis. Wenn ein Standard-Oszilloskop-Tastkopf an die Schaltung angeschlossen wird, können sich Parameter und Leistung dramatisch ändern. In diesem Abschnitt werden Techniken zum Messen der Schaltung auf eine Weise vorgeschlagen, die sie nicht so deutlich wie ein Standard-Oszilloskop-Tastkopf beeinflussen.

Eine aktive FET-Sonde kann etwa verwendet werden, um die Schaltung zu überwachen, ohne die Schaltungsparameter nachteilig zu beeinflussen. Diese Sonden sind ziemlich teuer, haben aber eine hohe Eingangsimpedanz. Typische FET-Sonden haben eine Eingangskapazität von unter 2 pF und einen Eingangswiderstand von über 5 MOhm.

Auch eine ausgewogene Belastung der Tastköpfe mit Widerständen und/oder Kondensatoren kann manchmal ermöglichen, dass eine hochohmige Schaltung mit einem Standardoszilloskop überwacht werden kann.

Unterschiedliche Bedingungen können den Start und die Leistung im eingeschwungenen Zustand stark beeinflussen. Hier sind ein paar Tests, mit denen man die Robustheit des Designs messen kann:

• Variieren Sie die Betriebsspannung von 3 auf 5,5 V. Der

Oszillator sollte zu schwingen beginnen und die Frequenz sollte leicht ansteigen, wenn die Spannung erhöht wird. Wenn sie abnimmt, wenn die Spannung fällt, dann ist das ein Zeichen, dass der Kristall gefährlich übersteuert wird.

• Steuern Sie die Anstiegszeit des Netzteils. Eine empirische Formel für den Frequenzgehalt einer steigenden Flanke ist:

$$f_{\max} \text{ ca.} = 1/(\pi \times \text{Anstiegszeit})$$

Eine sehr schnell ansteigende Betriebsspannung kann den Quarz bei der Resonanzfrequenz stimulieren!

• Wenn Sie ein 10-kOhm-Potentiometer in Reihe mit dem Kristall schalten, erhalten Sie einige Informationen zur Verstärkertoleranz. Mit zusätzlichem Widerstand wird die Schaltung weniger wahrscheinlich starten. Senken Sie langsam den Widerstand oder erhöhen sie von 0 Ohm an. Trennen Sie die Platine nach jedem Schritt von der Strom-

versorgung und schalten Sie sie wieder ein. Notieren Sie den Widerstandswert, bei dem der Oszillator gerade nicht startet. Der Gesamtwiderstand (Kristall + Potentiometer) muss wesentlich größer sein als der vom Quarzhersteller angegebene Worst-Case-Widerstand. Um Schaltungsvariationen zu berücksichtigen, ist es wünschenswert, dass die Schaltung mit dem doppelten maximalen Quarzwiderstand auch noch schwingt.

• Testen Sie unter niedrigen und hohen Temperaturen und bei hoher Luftfeuchtigkeit. Der Quarzwiderstand steigt mit der Temperatur. Das beeinträchtigt das Startverhalten und das stationäre Verhalten. Wenn größere Frequenzverschiebungen auftreten, liegt ein Problem vor.

• Überprüfen Sie die Platinenkapazität. Messen Sie die genaue Frequenz des Quarzoszillators mit einer streng definierten Lastkapazität auf einem separaten Gerät. Messen Sie dann die Frequenz auf der eigentlichen Leiterplatte. Wenn die beiden Frequenzen nicht gut korrelieren, kann auf eine unbekannte Streukapazität die Ursache sein.

Ein letzter Hinweis: Wenn der Oszillator beim Einschalten nicht zu schwingen beginnt, überprüfen Sie die Spannungen an EXTAL und XTAL. Wenn eine hoch und eine niedrig ist, liegen wahrscheinlich Streuimpedanzen vor, entweder zur Masse oder zur Stromversorgung. Wenn die Spannung bei EXTAL 2,5 V beträgt, dann ist der Rückkopplungswiderstand unzureichend oder es liegt ein starkes Rauschelement bei der Stromversorgung vor. ◀

C_x	C_y	U an EXTAL	Verlustleistung des Quarzes
56 pF	56 pF	3,3 Vpp	100 μ W
33 pF	56 pF	8 Vpp	199 μ W
47 pF	56 pF	6,1 Vpp	207 μ W
68 pF	68 pF	2,8 Vpp	102 μ W

Tabelle 1: Spannung an EXTAL und Drive Level für unterschiedliche Stabilisierungskondensatoren