## Moderne Quarzoszillatoren

# Hinweise zur Dimensionierung

**Schaltungsentwickler legen ihr Hauptaugenmerk auf die digitale Signalverarbeitung. Um den analog arbeitenden Teil, zu dem u. a. der Quarzoszillator für die Takterzeugung gehört, möchten sie sich möglichst wenig kümmern. Deshalb gibt *elektronik industrie* hier ein paar praktische Hinweise für die Dimensionierung von On-Chip-Oszillatoren in Pierce-Schaltung.**

Jeder Schaltungsentwickler, der zur Lösung seiner Aufgaben Mikroprozessoren einsetzt, muss sich mit der Erzeugung des Systemtaktes auseinandersetzen. Dieser Takt wird mit einem Oszillator auf dem Prozessor erzeugt, einem so genannten On-Chip-Oszillator, der die Einstellung der Frequenz in einem bestimmten Bereich erlaubt.
Als Frequenz-bestimmendes Bauelement wird überwiegend ein Schwingquarz eingesetzt.Damit der Oszillator unter allen möglichen Betriebsbedingungen zuverlässig funktioniert, ist eine Anpassung der externen Bauelemente an den On-Chip-Oszillator notwendig. Das ist erforderlich, da sich in der Praxis herausgestellt hat, dass die Schwingsicherheit der Oszillatoren verschiedener Hersteller und Typen von mangelhaft bis sehr gut variiert.
Der Schaltungsentwickler legt sein Hauptaugenmerk auf die digitale Signalverarbeitung. Um den analog arbeitenden Teil, zu dem der Quarzoszillator gehört, möchte er sich möglichst wenig kümmern. Deshalb sollen hier ein paar praktische Hinweise für die Dimensionierungvon On-Chip-Oszillatoren gegeben werden.
Als Oszillator-Typen werden Pierce- und die Colpitts-Schaltung angewandt, wobei die Pierce-Schaltung überwiegt. Die folgenden Ausführungen gelten für die Pierce-Schaltung. Da die Bedingungen auf dem Chip als gegeben hingenommen werden müssen, kann man sich nur der äußeren Beschaltung widmen. Beim Pierce-Oszil-

AUTOR

Hellmut Bumiller
Jauch Quartz GmbH

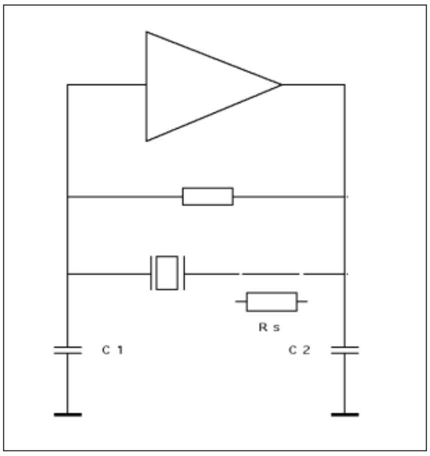


Bild 1: Je ein Kondensator am Ein- und Ausgang dient beim Pierce-Oszillator zur zusätzlichen Phasendrehung und Frequenzeinstellung.

lator liegt der Quarz im Rückkopplungszweig einer Verstärkerschaltung zwischen Aus- und Eingang. Je ein Kondensator am Ein- und Ausgang gegen Masse dient zur zusätzlichen Phasendrehung und Frequenzeinstellung (**Bild 1**). Die sich einstellende Frequenz ist die Lastresonanzfrequenz fL.

### Quarzeigenschaften

Vor der Wahl eines Quarzes sollte man sich mit seinen Eigenschaften vertraut machen, besonders dann, wenn man enge Toleranzforderungen erfüllen muss. Für die Taktung der Prozessoren werden meistens AT-Schnitt-Quarze im Grundton für einen Frequenzbereich von 3,5...40 MHz verwendet.
Dabei sind folgende Eigenschaften zu berücksichtigen:

- **Frequenztoleranz bei Raumtemperatur.** Der Standardwert liegt bei ± 30 ppm. Eine Toleranz von ± 5 ppm kann produziert werden. Bei der Angabe einer Lastkapazität CL ist der Quarz auf diese Kapazität abgestimmt.
- **Frequenztoleranz im Temperaturbereich.** Der Temperaturkoeffizient der Frequenz TKf für AT-Quarze folgt einer Parabel 3.Grades. Auch hier kann die Toleranz durch besondere Produktionsmaßnahmen eingeengt werden. Zu beachten ist, dass durch die resultierende Kapazität des Oszillators die ▶

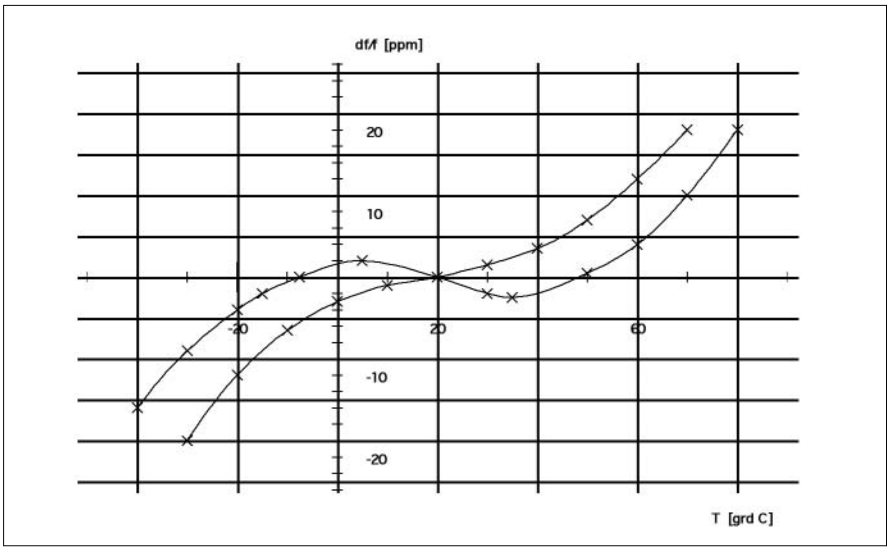


Bild 2: Zu beachten ist, dass durch die resultierende Kapazität des Oszillators die TK-Kurve gegen den Uhrzeigersinn gedreht wird und sich somit die Frequenz verschiebt.

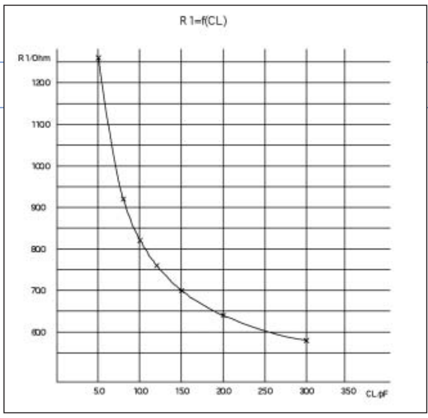


**Bild 3: Einfluss der Lastkapazität am Beispiel eines 4-MHz-Quarzes.**

TK-Kurve gegen den Uhrzeigersinn gedreht wird und sich somit die Frequenz verschiebt (**Bild 2**).

- Lastresonanzfrequenz fL
  Durch die resultierende Kapazität $CL_{ist}$ erhöht sich die Serienresonanzfrequenz fs nach der Formel **[1]**

$$fL = fs + fs \frac{C1}{2\left(Co + CL_{ist}\right)} \qquad [1]$$

mit C1=dynamische Kapazität des Quarzes Co=statische Kapazität des Quarzes

Das $CL_{ist}$ wirkt wie eine Reihenschaltung aus dem Quarz und einem Kondensator.

- Lastresonanzwiderstand RL
  Der Serienresonanzwiderstand R1 erhöht sich durch die Lastkapazität nach :

$$RL = R1\left(1 + \frac{Co}{CL}\right)^2 \qquad [2]$$

In **Bild 3** ist der Einfluss der Lastkapazität am Beispiel eines 4-MHz-Quarzes dargestellt.

- Dynamische Kapazität C1
  C1 hat einen großen Einfluß auf die Ziehfähigkeit der Frequenz TS (**Bild 4**). TS

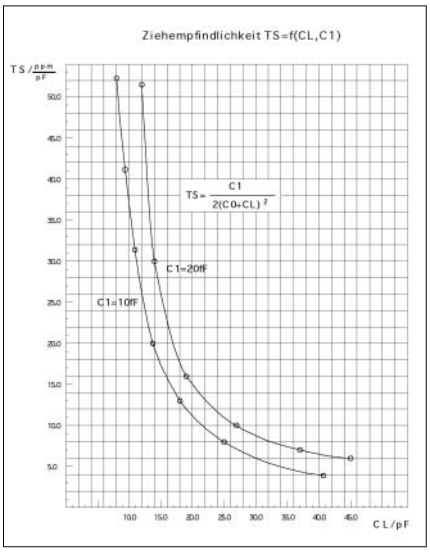


**Bild 4: C1 hat einen großen Einfluss auf die Ziehfähigkeit der Frequenz TS.**

wird in ppm/pF angegeben. Es ist zu erkennen, dass bei hohem C1 und kleinem CL Toleranzschwankungen der Bauelemente zu großen Frequenzänderungen führen. Bei spannungsgesteuerten Quarzoszillatoren (VCXO) hingegen ist ein großes C1 erwünscht, um einen weiten Frequenzbereich überstreichen zu können. Deshalb setzt man hier auch Grundton-Quarze ein, weil deren C1 etwa um den Faktor 10 größer ist als das C1 von Oberton-Quarzen (**Bild 5**).

Für eine überschlägige Berechnung der Ziehfähigkeit bzw. der Toleranzempfindlichkeit der Schaltung muss C1 bekannt sein. Da meist kein spezielles Quarzmessgerät zur Verfügung steht, soll ein Beispiel nach dem Messverfahren mit zwei Lastkapazitäten angegeben werden :
Man misst die Serienresonanzfrequenz fs in einem Netzwerkanalysator.
Dann schaltet man jeweils einen Keramik-Kondensator unterschiedlicher Kapazität in Reihe zum Quarz und misst die beiden Frequenzen $f_{CL1}$ und $f_{CL2}$.
Dann berechnet man C1 mit

$$C1 = \frac{2\Delta CL}{fs} \cdot \frac{\Delta f_{CL1} \cdot \Delta f_{CL2}}{\Delta f} \qquad [3]$$

mit $\Delta CL = CL2 - CL1$
$\Delta f = f_{CL1} - f_{CL2}$
$\Delta f_{CL1} = f_{CL1} - fs$
$\Delta f_{CL2} = f_{CL2} - fs$

Die Werte mit einem 4-MHz-Quarz können folgendermaßen aussehen:
$CL_1$ = 20 pF
$CL_2$ = 25 pF
$f_{CL1}$ = 3,999587 MHz
$f_{CL2}$ = 3,999443 MHz
fs = 3,998776 MHz
CL = 5 pF
f = 144 Hz
$f_{CL1}$ = 811 Hz
$f_{CL2}$ = 667 Hz

Ergebnis : C1 = 9,39 fF aus der Messung berechnet (C1 = 9,3 fF mit einem Quarzmeßgerät gemessen )

## Messung der Schwingsicherheit SF

Die Schwingsicherheit SF (Safety Factor) wird berechnet zu

$$SF = \frac{Rs}{RL_{max}} \qquad [4]$$

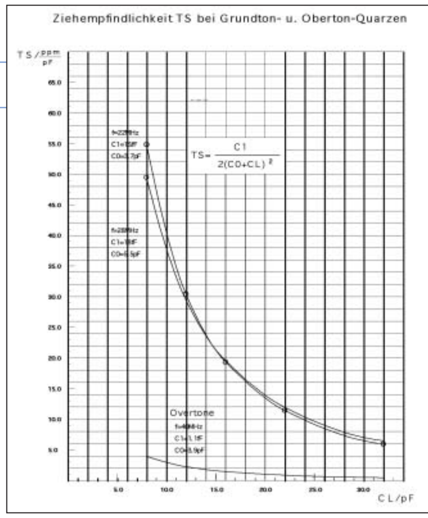


**Bild 5: Ziehempfindlichkeit TS bei Grund- und Obertonquarz.**

mit Rs = maximal möglicher Reihenwiderstand zum Quarz, bei dem der Oszillator noch schwingt
RLmax = maximaler Lastwiderstand, berechnet mit dem im Datenblatt angegebenen maximalen R1 .

SF ist ein Maß für die Fähigkeit der Schaltung, bis zu welcher Erhöhung des Quarzwiderstandes die Schwingung erhalten bleibt. SF<5 wird bei den meisten Anwendungen als kritisch angesehen.
Für den Automotive-Bereich hat sich ein SF ≥ 10 als akzeptabel erwiesen.
Um hier auf der sicheren Seite zu sein, ist unbedingt eine Überprüfung notwendig. Bei zu geringem SF ergibt oft eine Verringerung der Lastkapazität eine Erhöhung von SF. Das Diagramm in **Bild 6** zeigt an einem Beispiel die Abhängigkeit von SF bei der Änderung der Lastkapazität CL.
Bei der Überprüfung geht man folgendermaßen vor:

### Messung der Lastkapazität $CL_{ist}$ auf der Platine.

Zur Berechnung von RLmax benötigt man die gesamte Lastkapazität $CL_{ist}$ für den Quarz auf der Platine.
$CL_{ist}$ läßt sich grob mit folgender Formel abschätzen:

$$CL_{ist} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + C_{Chip} + C_{Streu} \qquad [5]$$

Beispielsweise beträgt

$$CL_{ist} = \frac{15\ pF \cdot 15\ pF}{30\ pF} + 5\ pF + 1\ pF = 13{,}5\ pF$$

Über den Umweg einer Frequenzmessung kann man $CL_{ist}$ aber genauer ermitteln. Die Frequenz hat sich nämlich auf Grund der Lastkapazität eingestellt. ▶

Damit durch einen Tastkopf nicht die Lastkapazität verändert wird, sollte der Tastkopf an einen HF-Verstärker angeschlossen werden, um für einen Zählfrequenzmesser die nötige Spannung aus dem Nahfeld des Quarzes, d. h. berührungslos, zu ermitteln.

Dann lötet man den Quarz aus und misst ihn in Reihe mit einem Kapazitätstrimmer in einem Netzwerkanalysator. Der Trimmer sollte annähernd die zu erwartende Lastkapazität besitzen.

Nun variiert man mit dem Trimmer die Kapazität, bis dieselbe Frequenz, wie auf der Platine, gemessen wird.

Anschließend misst man die Kapazität des Trimmers auf einer C-Meßbrücke.

Die Kapazität des Trimmers = die Lastkapazität $CL_{ist}$ der Schaltung.

**Berechnung des maximalen Lastwiderstandes RLmax**

RLmax wird berechnet mit

$$RL_{max} = R1_{max} \cdot \left(1 + \frac{CO}{CL_{ist}}\right)^2 \quad [6]$$

mit $R1_{max}$ aus dem Datenblatt
Co des Quarzes, gemessen mit einer C-Meßbrücke.

**Bestimmung des maximalen Reihenwiderstandes Rs**

Zur Bestimmung der Schwingsicherheit wird in Reihe zum Quarz ein Schichtwiderstand geschaltet (**Bild 1**). Damit kann man eine Erhöhung des Quarzwiderstandes angenähert simulieren und so die Grenze der Schwingfähigkeit ermitteln.

Der Widerstand ist so weit zu vergrößern, bis die Schwingung aussetzt.

Dann ist der Widerstand soweit zu verkleinern, bis die Schwingung wieder einsetzt. Dieses Verfahren ist gegebenenfalls mehrfach zu wiederholen, bis nach mehrmaligem Ein- und Ausschalten der Betriebsspannung die Schwingung nach dem Einschalten noch sicher einsetzt. Damit hat man nun den Grenzwert des Widerstandes gefunden.

Mit Rs und RLmax kann nun die Schwingsicherheit SF berechnet werden. An einem Beispiel mit einem 4 MHz-Oszillator auf dem Prozessor M430F148 von Texas Instruments und C1 = C2 = 56 pF wurden folgende Werte ermittelt:

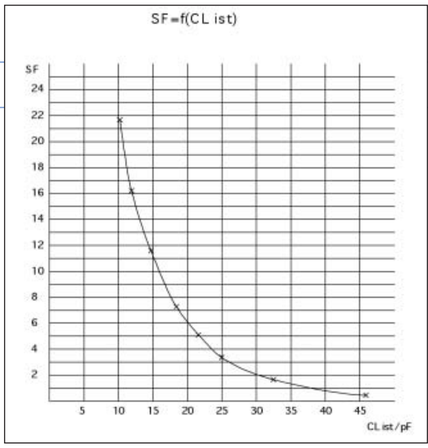


**Bild 6: Abhängigkeit der Schwingsicherheit SF auf Änderungen der Lastkapazität CL.**

(Der eingesetzte Quarz ist für eine Last von 30 pF ausgelegt.) fL = 3,999940 MHz (berührungslos gemessen) entspricht

$$\frac{\Delta f}{f} = -15 \text{ ppm}$$

$CL_{ist}$ = 32 pF (ermittelt mit einem C-Trimmer in Reihe zum Quarz auf einem Netzwerkanalysator und anschließend auf einer C-Meßbrücke)

Rs = 90 Ω (maximaler Reihenwiderstand, bei dem der Oszillator noch sicher schwingt)

Co = 1,7 pF (gemessen auf einer C-Meßbrücke)

$R1_{max}$ = 120 Ω (aus dem Datenblatt)

$$RL_{max} = R1_{max} \cdot \left(1 + \frac{Co}{CL_{ist}}\right)^2$$

$$= 120\ \Omega \cdot \left(1 + \frac{1{,}7\text{ pF}}{32\text{ pF}}\right) \approx 133\ \Omega$$

$$SF = \frac{R_s}{PL_{max}} = \frac{90\ \Omega}{133\ \Omega} \approx 0{,}7$$

Das ist ein völlig unakzeptabler Wert! Durch eine Verringerung der Lastkapazität soll versucht werden, die Schwingsicherheit zu erhöhen.

Mit $C_1 = C_2$ = 15 pF wurden folgende Werte gemessen:

fL = 4,000364 MHz (berührungslos gemessen) entspricht

$$\frac{\Delta f}{f} = +91 \text{ ppm}$$

$CL_{ist}$ = 11,1 pF (ermittelt mit einem C-Trimmer in Reihe zum Quarz auf einem Netzwerkanalysator u. anschließend auf einer C-Meßbrücke)

Rs = 1650 Ω (maximaler Reihenwiderstand, bei dem der Oszillator noch sicher schwingt)

Co = 1,7 pF (gemessen auf einer C-Meßbrücke)

$R1_{max}$ = 120 Ω (aus dem Datenblatt)

$$RL_{max} = R1_{max} \cdot \left(1 + \frac{Co}{CL_{ist}}\right)^2$$

$$= 120\ \Omega \cdot \left(1 + \frac{1{,}7\text{ pF}}{11{,}1\text{ pF}}\right)^2 = 159{,}6\ \Omega$$

$$SF = \frac{R_s}{RL_{max}} = \frac{1650\ \Omega}{159{,}6\ \Omega} = 10{,}3$$

Dieser Wert ist akzeptabel. Sollte die Frequenzabweichung von + 91 ppm zu hoch sein, so ist ein solcher Quarz einzusetzen, der für eine Last von 12 pF ausgelegt ist. Als Zusatzeffekt dieser Messung läßt sich aus **[5]** die resultierende Kapazität des Chips und der Leiterplatte errechnen:

$$C_{Chip} + C_{Streu} = CL_{ist} - \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2}$$

$$= 11{,}1\text{ pF} - \frac{15\text{ pF} \cdot 15\text{ pF}}{15\text{ pF} + 15\text{ pF}}$$

$$= 3{,}6\text{ pF}$$

Aus der Rechnung mit $C_1 = C_2$ = 56 pF bekommt man 4,0 pF. In guter Näherung nimmt man für $C_{Chip} + C_{Streu} \approx$ 3,8 pF.

Diesen Wert muss man bei einer neuen Wahl von $C_1$ und $C_2$ hinzurechnen. Man erhält damit schnell das neue $CL_{ist}$.

Aus der Frequenzdifferenz und den beiden $CL_{ist}$-Werten läßt sich auch C1 berechnen. Mit C1 kann man dann leicht eine Frequenzänderung bei einer Kapazitätsänderung oder die Ziehsteilheit bei kleiner Kapazitätsänderung ermitteln. Aus der Formel für die Berechnung des Ziehbereiches für zwei Lastkapazitäten :

$$\frac{f_{CL2} - f_{CL1}}{f} = \frac{C1 \cdot (CL1_{ist} - CL2_{ist})}{2 \cdot (Co + CL1_{ist}) \cdot (Co + CL2_{ist})}$$

erhält man

$$C1 = \frac{\left(\frac{f_{CL2} - f_{CL1}}{f}\right) \cdot 2 \cdot (CO + CL1_{ist}) \cdot (CO + CL2_{ist})}{\Delta CL_{ist}} \quad [7]$$

$$C1 = \frac{\frac{4{,}000364\text{ MHz} - 3{,}999940\text{ MHz}}{4{,}0\text{ MHz}} \cdot 2 \cdot (1{,}7 + 32)\text{pF} \cdot (1{,}7 + 11{,}2)\text{pF}}{(32 - 11{,}1)\text{pF}}$$

$$\approx 4{,}4\text{ fF}$$

**Messung der Quarzleistung PQ**

Der durch den Quarz fließende HF-Strom wird am Quarzwiderstand in Leistung um-

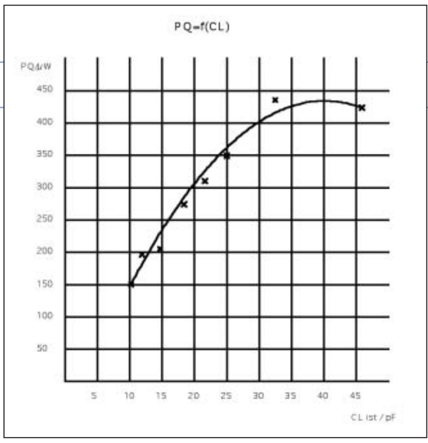


**Bild 7: Einfluss von CL auf die Quarzleistung Po.**

gesetzt. Diese Leistung sollte im Bereich von 10 µW... 200 µW liegen.
Die Leistung kann durch zwei Möglichkeiten beeinflusst werden:
durch die Lastkapazität und durch einen Widerstand zwischen dem Oszillatorausgang und dem Knoten von Quarz und $C_2$.
Wie groß der Einfluss von CL sein kann, wird in **Bild 7** gezeigt. Daher ist auch hier eine Überprüfung angebracht.
Da im Resonanzfall nur der reelle Quarzwiderstand wirkt, ist die Berechnung der Leistung mit Hilfe des Quarzstromes leicht möglich. Dazu lötet man einen etwa 2 cm langen Draht an jeden Quarzanschluss an und führt einen Draht durch eine HF-Stromsonde. Der zu erwartende Strom liegt zwischen einigen 100 µA bis zu einigen mA. Mit der Sonde wird der HF-Strom in eine analoge HF-Spannung gewandelt. Diese Spannung kann man mit einem Oszilloskop messen.
Die Leistung errechnet sich zu

$$PQ = I^2 \cdot RL \qquad [8]$$

Die Leistung soll anhand des vorherigen Beispiels berechnet werden.
Mit R1 = 49 Ω (gemessen auf einem Netzwerkanalysator)
$C_1 = C_2 = 56$ pF

$$RL = R1\left(1 + \frac{CO}{CL_{ist}}\right)^2 \qquad [9]$$

$$RL = 49\ \Omega\left(1 + \frac{1{,}7pF}{32pF}\right) = 54{,}3\ \Omega$$

Mit der Stromsonde und dem Oszilloskop wurden 6,5 $mV_{eff}$ gemessen.
Mit einem Konversionsfaktor der HF-Stromsonde von beispielsweise 5 mV/mA errechnet man:

$$PQ = \left(\frac{6{,}5mV}{5}\right)^2 \cdot 54{,}3\ \Omega = 91{,}8\ \mu W$$

Bei Verkleinerung der Last auf $C_1 = C_2 = 15$ pF ergibt RL :

$$RL = 49\ \Omega\left(1 + \frac{1{,}7pF}{11{,}1pF}\right) = 65{,}2\ \Omega$$

Mit der Stromsonde und dem Oszilloskop wurden 3,5 $mV_{eff}$ gemessen.
Daraus errechnet man:

$$PQ = \left(\frac{3{,}5\ mV}{5}\right)^2 \cdot 65{,}2\ \Omega = 31{,}9\ \mu W$$

## Zusammenfassung

Es wurden der Einfluss der Eigenschaften von AT-Grundwellenquarzen auf die Messergebnisse bei Quarzoszillatoren gezeigt und Hinweise für die Dimensionierung gegeben.
Anhand eines Rechenbeispiels für einen ON-Chip-Oszillator wurde beschrieben, wie durch eine Veränderung der Lastkapazität für den Quarz die Schwingsicherheit erhöht werden kann und wie sich dabei die Quarzleistung verändert. (sb)

**Literatur**

infineon AP242005
Katalog Jauch Quartz GmbH

**infoDIRECT** ***422ei0706***
www.elektronik-industrie.de
► Link zu **Jauch Quartz GmbH**