



DESIGN GUIDELINES FÜR QUARZE

Susanna Engel Rodrigues
Field Application Engineer – Frequency Products

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

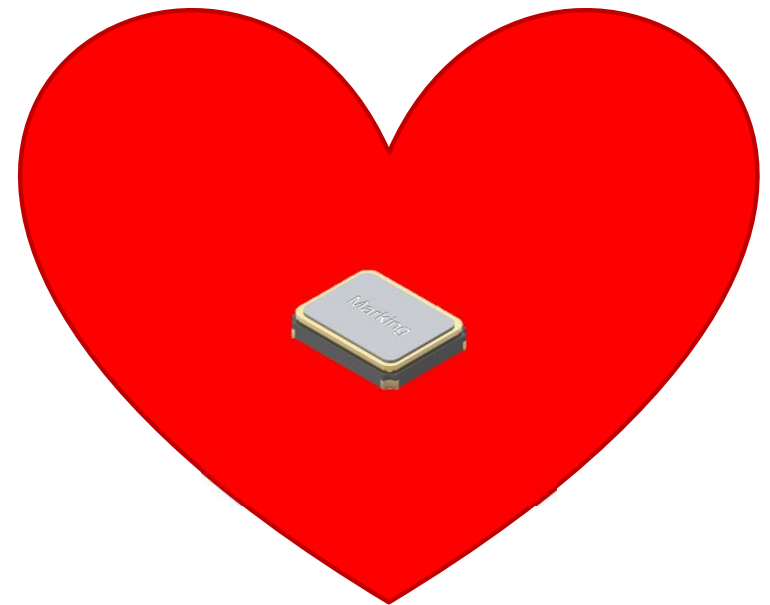
Agenda

- Allgemeines
- Design Guidelines
- Design In von kleinen Quarzen
- PCB Layout



Was ist eigentlich ein Quarz?

- Ein schönes Schmuckstück
- Rosenquarz gilt zum Beispiel in der Esoterik als Symbol für Liebe und Fruchtbarkeit
- Siliziumdioxid (SiO_2)
- Frequenzgebendes Bauteil
- Elektronisches Bauteil das als Zeitbasis dient



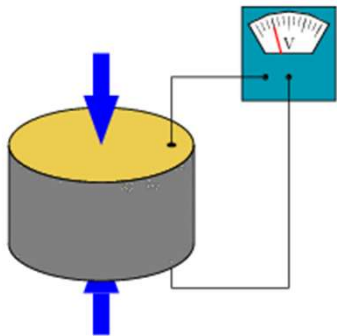
Warum schwingt ein Quarz eigentlich?



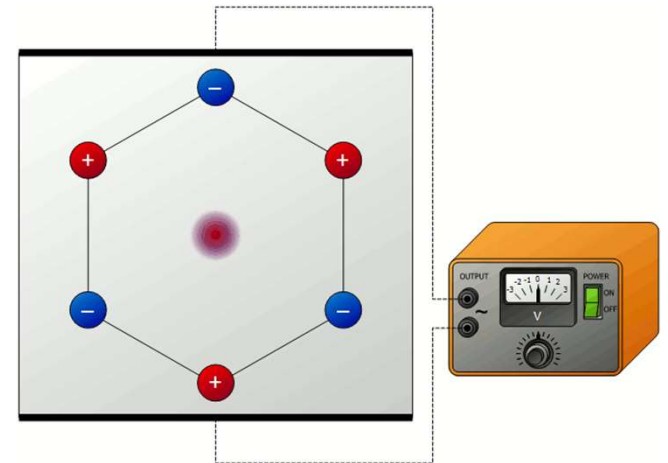
Piezoelektrischer Effekt

- Der piezoelektrische Effekt kann in zwei Versionen auftreten

Direkter piezoelektrischer Effekt:

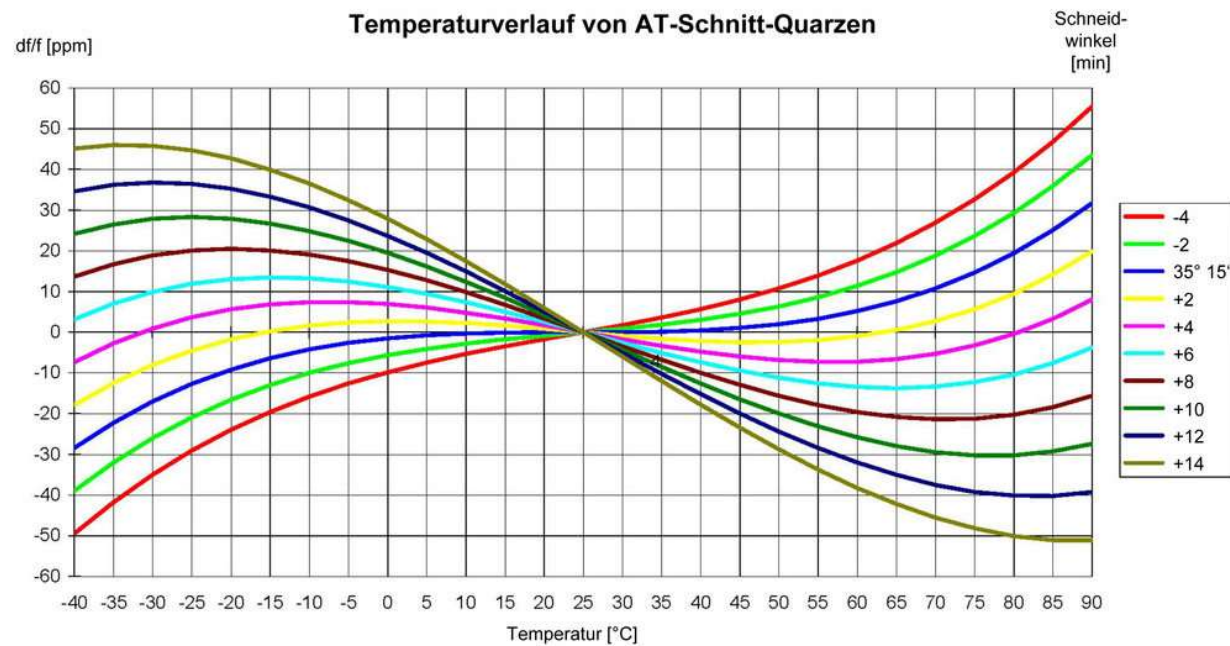


Inverser piezoelektrischer Effekt:



Was ist denn besonders an einem Quarz?

- Sehr genau



- Sehr stabil – auch über einen langen Zeitraum

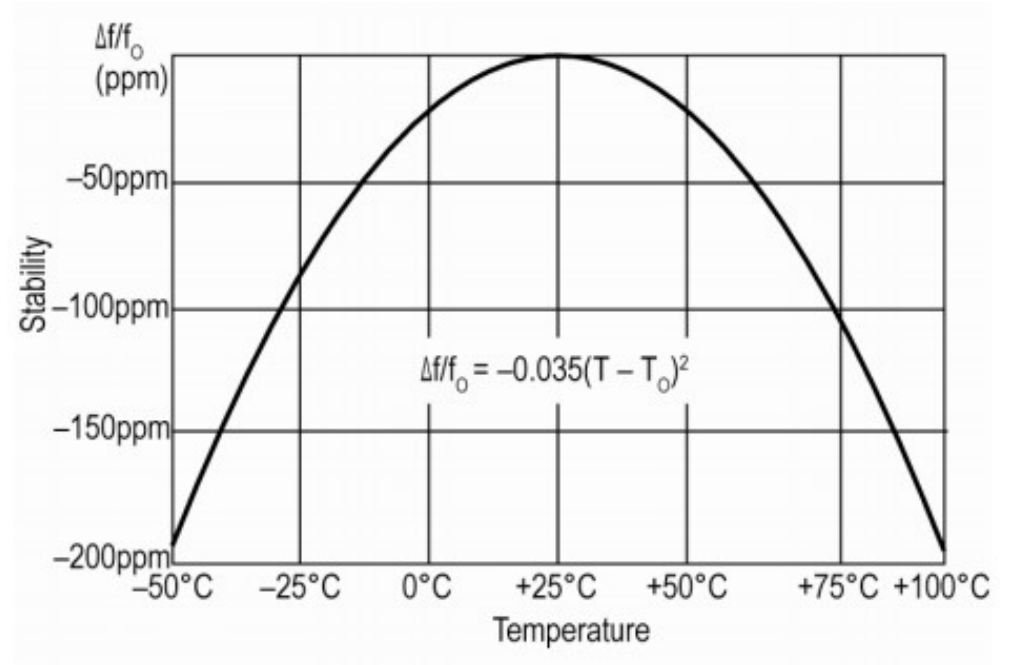
MHz Quarze @ WE

IQXC-240	IQXC-26	IQXC-42	CFPX-218	CFPX-180
				
1,2 x 1,0 mm	1,6 x 1,2 mm	2,0 x 1,6 mm	2,5 x 2,0 mm	3,2 x 2,5 mm
ab 32 MHz	Ab 24 MHz	Ab 16 MHz	Ab 16 MHz	Ab 8 MHz

CFPX-104	12SMX-B	HC49	HC49/4H	HC49/4HSMX
				
5,0 x 3,2 mm	7,0 x 5,0 mm	11,05 x 4,7 mm	11,05 x 4,7 mm	13,4 x 4,9 mm
ab 8 MHz	Ab 8 MHz	Ab 1,8432 MHz	Ab 3,2768 MHz	Ab 3,2768 MHz

Der Uhrenquarz

- Sehr genau bei 25 °C
- Blank in Form einer Stimmgabel
- 32,768 kHz



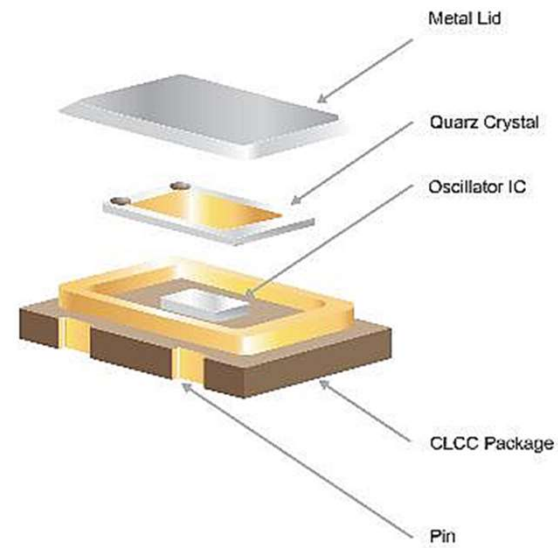
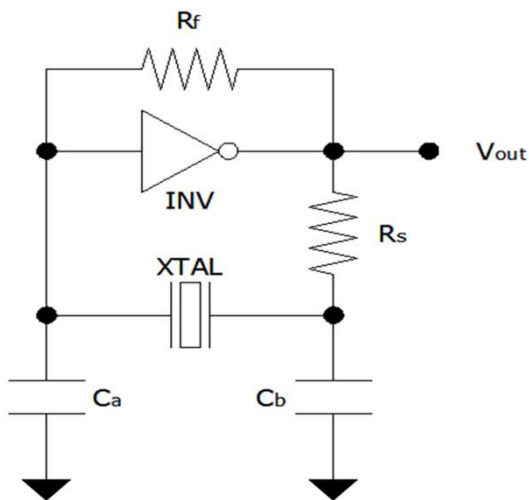
Uhrenquarze @ WE

IQXC-146	IQXC-90	IQXC-25	2 x 6 Watch
			
1,2 x 1,0 mm	1,6 x 1,0 mm	2,0 x 1,2 mm	2,0 x 6,0 mm

CFPX-56	3 x 8 Watch	CFPX-217 / IQXC-217	85SMX
			
2,0 x 6,0 mm	3,0 x 8,0 mm	3,2 x 1,5 mm	8,7 x 3,8 mm

Der Oszillator

- Jeder Quarz braucht eine Oszillatorenschaltung, damit er schwingt



SPXOs @ WE

Standard (H)CMOS Oszillatoren

IQXO-542	IQXO-540	IQXO-794	IQXO-791
			
2,0 x 1,6 mm	2,0 x 1,6 mm	2,5 x 2,0 mm	2,5 x 2,0 mm
1,8 V	3,3 V	1,8 V	3,3 V

CFPS-39	CFPS-9	CFPS-73	CFPS-72
			
3,2 x 2,5 mm	5,0 x 3,2 mm	7,0 x 5,0 mm	7,0 x 5,0 mm
3,3 V	3,3 V	3,3 V	5,0 V

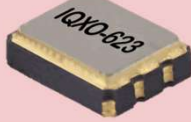
SPXOs @ WE

32,768 kHz Oszillatoren

IQXO-404	IQXO-402	CFPS-107	CFPS-109	CFPS-102	CFPS-104
					
2,0 x 1,6 mm	2,0 x 1,6 mm	2,5 x 2,0 mm	2,5 x 2,0 mm	3,2 x 2,5 mm	3,2 x 2,5 mm
1,8 V	3,3 V	1,8 V	3,3 V	1,8 V	3,3 V

SPXOs @ WE

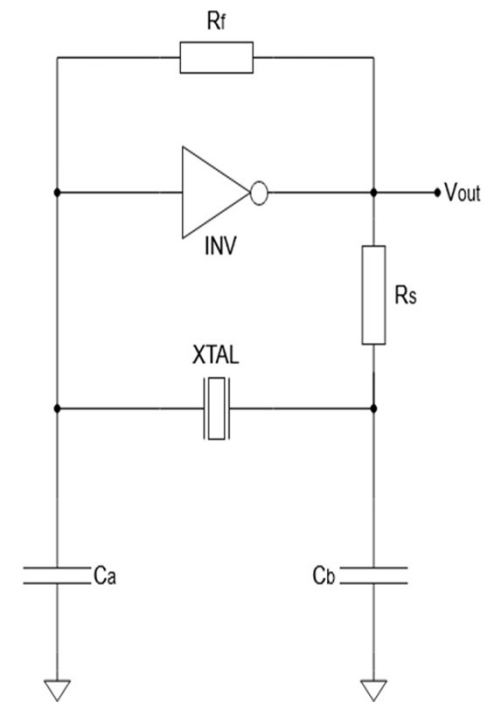
LVDS / LVPECL Oszillatoren

IQXO-618-25	IQXO-618-33	IQXO-623	IQXO-624
			
3,2 x 2,5 mm	3,2 x 2,5 mm	3,2 x 2,5 mm	3,2 x 2,5 mm
2,5 V	3,3 V	2,5 V	3,3 V

LET'S GET IT STARTED

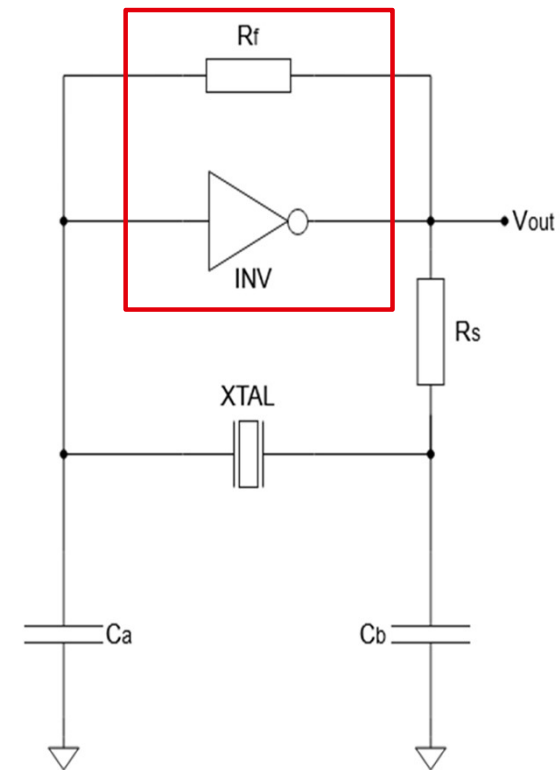
Generelles Vorgehen

- Alle folgenden Tipps und Berechnungen beziehen sich auf den Aufbau eines sogenannten Pierce Oszillators!
- Datenblatt des Mikrokontrollers überprüfen:
 - Angaben zur benötigten Frequenz, Stabilität, Drive Level, etc
 - Evtl. Angaben zur Eingangs- und Ausgangskapazität des Mikrokontrollers
- Quarz raussuchen
- C_a und C_b berechnen
- Verstärkung berechnen
- Drive Level & R_s berechnen
- Verstärkung überprüfen
- Ergebnis messen (fertiges PCB Design)



Inverter und Widerstand R_f

- R_f wird für die negative Rückkopplung des Inverters verwendet
 - Das sorgt für ein lineares Verhalten des Inverters und eine höhere Verstärkung
- In fast allen Fällen ist der Widerstand R_f und der Inverter bereits im Mikrokontroller integriert

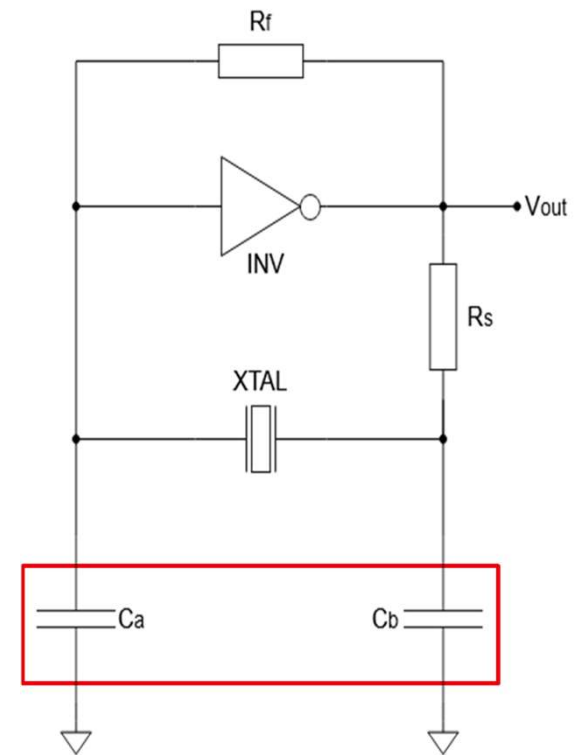


Lastkapazität - C_a und C_b

- Soll: Lastkapazität Quarz = Lastkapazität Schaltung!
- Formel zur Berechnung der Lastkapazität:

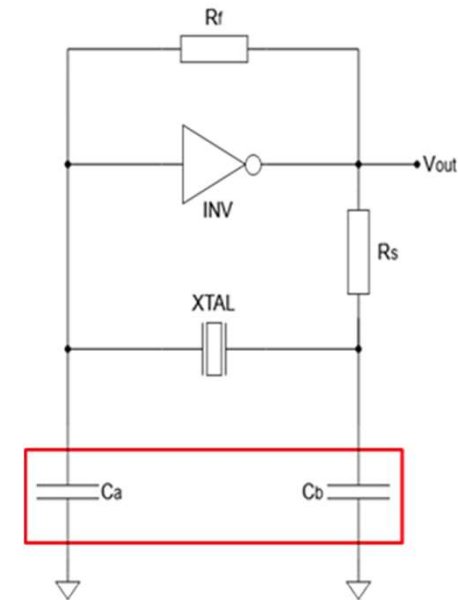
$$C_L = \frac{C_a * C_b}{C_a + C_b} + C_{stray}$$

- Die Streukapazität C_{stray} beinhaltet:
 - die Kapazität der Leiterbahnen
 - die IC/Inverter Eingangs- und Ausgangskapazitäten
- Die Streukapazität kann anfangs lediglich geschätzt und später durch eine Messung bestätigt werden



C_a und C_b - Lastkapazität

- C_a und C_b sollten bestenfalls die gleichen Werte haben
- Wenn nicht, sollte $C_a < C_b$ sein
- C_L sollte nie kleiner sein als $2 \cdot C_0$
- Die Streukapazität C_{stray} liegt typischerweise zwischen 2 und 4 pF
- Ganz wichtig:
 C_a und C_b bitte nicht weglassen!



$$C_L = \frac{C_a * C_b}{C_a + C_b} + C_{stray}$$

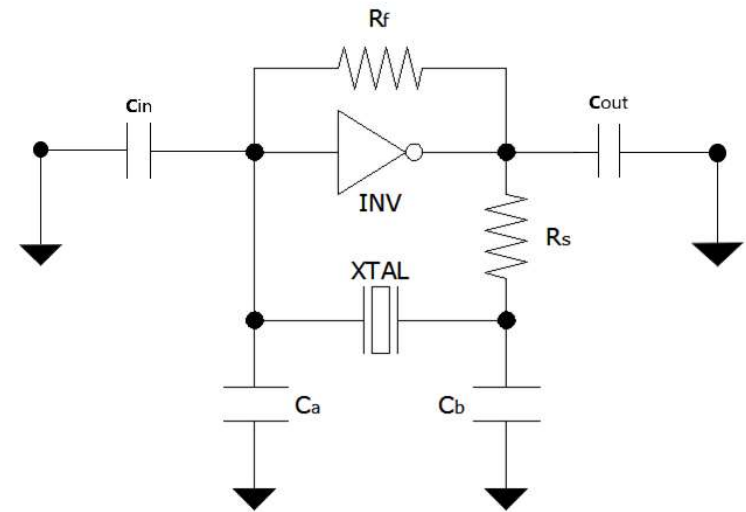
C_a und C_b - Lastkapazität

Wenn C_{in} und C_{out} bekannt

- Wenn die Eingangs- und Ausgangskapazität des Mikrocontrollers bekannt ist:

$$C_L = \frac{(C_{in} + C_a) * (C_b + C_{out})}{(C_{in} + C_a + C_b + C_{out})} + C_{stray}$$

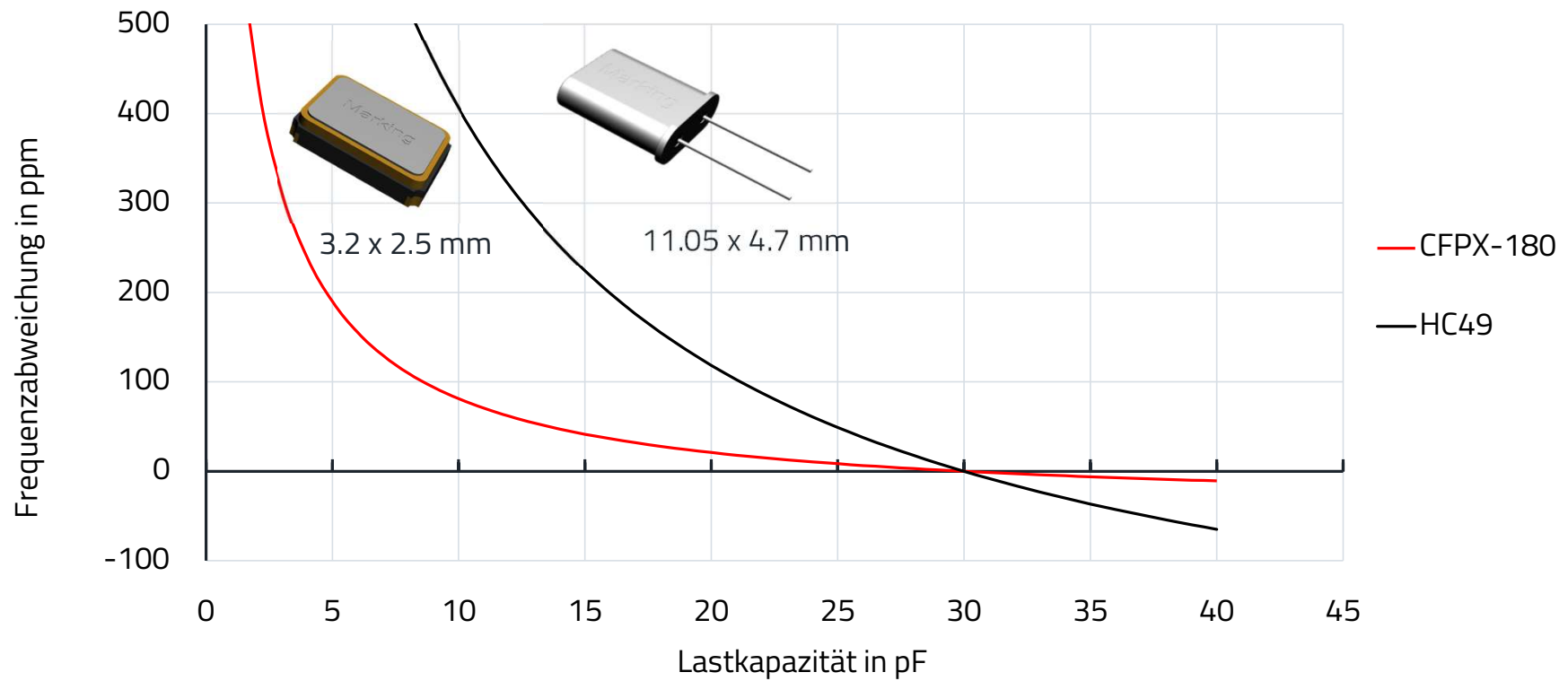
- C_{in} und C_{out} sind die Eingangs- und Ausgangskapazität des Mikrocontrollers
- C_{stray} enthält noch die Kapazität der Leiterbahnen und beträgt etwa 2 pF



Was passiert denn, wenn ich die Lastkapazität falsch wähle?

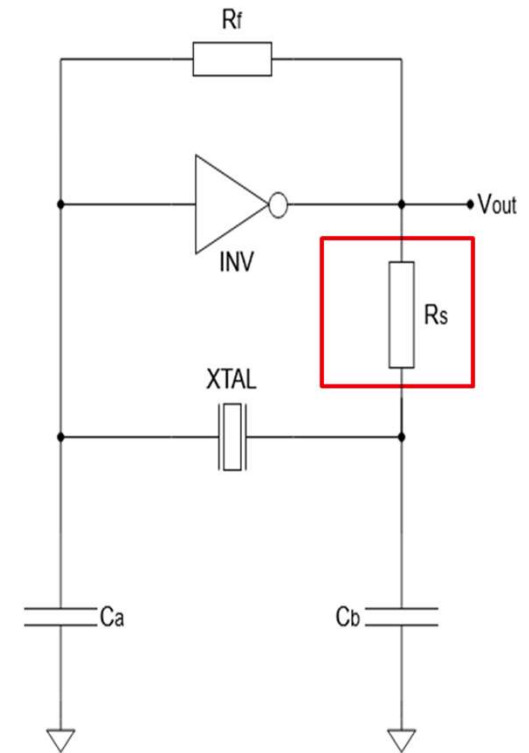


Frequenzänderung CFPX-180 vs. HC49



Widerstand R_s

- Hauptaufgaben des Widerstands R_s :
 - Reduziert die Leistung die über den Quarz geht und bewahrt ihn somit vor Schäden
 - Isoliert den Ausgang des Inverters (V_{out}) von der komplexen Impedanz des Quarzes, C_a und C_b
 - Bildet mit C_b einen Tiefpassfilter, der den Quarz zwingt, auf seiner Resonanzfrequenz im Grundton zu schwingen
 - R_s und C_b bilden ein Verzögerungsnetzwerk (Phase Lag Network) um zu einer zusätzliche Phasendrehung zu führen → notwendig für kleine Frequenzen (≤ 8 MHz); diese Phasendrehung reduziert außerdem Jitter und Phasenrauschen
- R_s sollte gleich X_{C_b} sein:
$$R_s = X_{C_b} = \frac{1}{2\pi f C_b}$$



Drive level

- Der Drive Level ist die Leistung, die im Quarze umgewandelt wird
 - Ist der Drive Level zu hoch, kann das dem Quarz schaden oder ihn zerstören
 - Ist der Drive Level zu niedrig, kann der Quarz gegebenenfalls nicht anschwingen
- Messung des Drive Level:
 - Messung des Effektivstromes, der über den Quarz fließt: I_Q
 - Berechnung des ESR / Messung des ESR des Quarzes: $ESR = R_1 \times (1 + \frac{C_0}{C_L})^2$
 - Berechnung des Drive Level
$$DL = ESR \times I_Q^2$$
- Überprüfung, ob der Drive Level der Schaltung zu hoch ist

Negative Verstärkung / Gain

- Die Verstärkung (Gain) muss groß genug sein, damit der Quarz sicher, auch über Temperatur, anschwingt
- Die Verstärkung wird auch als „negativer Widerstand (negative resistance)“ bezeichnet
- Der negative Widerstand der Schaltung entspricht unter idealen Bedingungen ohne Betrachtung von C_0 :

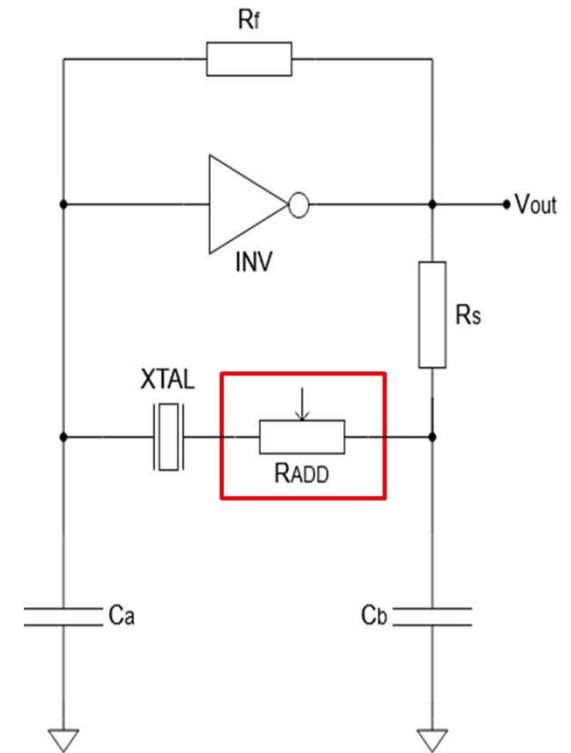
$$-R = -g_m * X_{C_a} * X_{C_b} = \frac{g_m}{\omega^2 C_a C_b}$$

- Es gibt zwei Möglichkeiten die Verstärkung der Schaltung zu verbessern:
 - g_m (= Transconductance des Mikrokontrollers) muss erhöht werden
 - Die Kondensatoren C_a und C_b müssen verkleinert werden

Messung des negative Widerstands

- Der negative Widerstand kann durch einen Widerstand R_{ADD} in Serie mit dem Quarz überprüft werden
- Der Widerstand wird dazu verwendet den größtmöglichen Wert $R_{ADD\ max}$ zu finden, bei dem der Quarz noch schwingt

$$\text{Negativer Widerstand des Oszillators} = R_{ADD\ max} + ESR$$



Sicherheitsfaktor SF

- Der Sicherheitsfaktor ist das Verhältnis von negativem Widerstand des Oszillators zum ESR des Quarzes
- Wird oft auch als Gain Margin oder negatives Widerstandsverhältnis (Negative Resistance Ratio) bezeichnet
- Der Sicherheitsfaktor ist ein Indikator dafür, wie stabil die Oszillation sein wird

$$SF = \frac{\text{Negativer Widerstand}}{ESR} = \frac{R_{ADDmax} + ESR}{ESR}$$

- $SF > 3$: Der Quarz schwingt
- $SF \geq 5$: Eine stabile Schwingung ist auch über Chargenschwankungen und Temperaturänderungen gewährleistet

Weitere Möglichkeit zur Berechnung des Sicherheitsfaktors SF

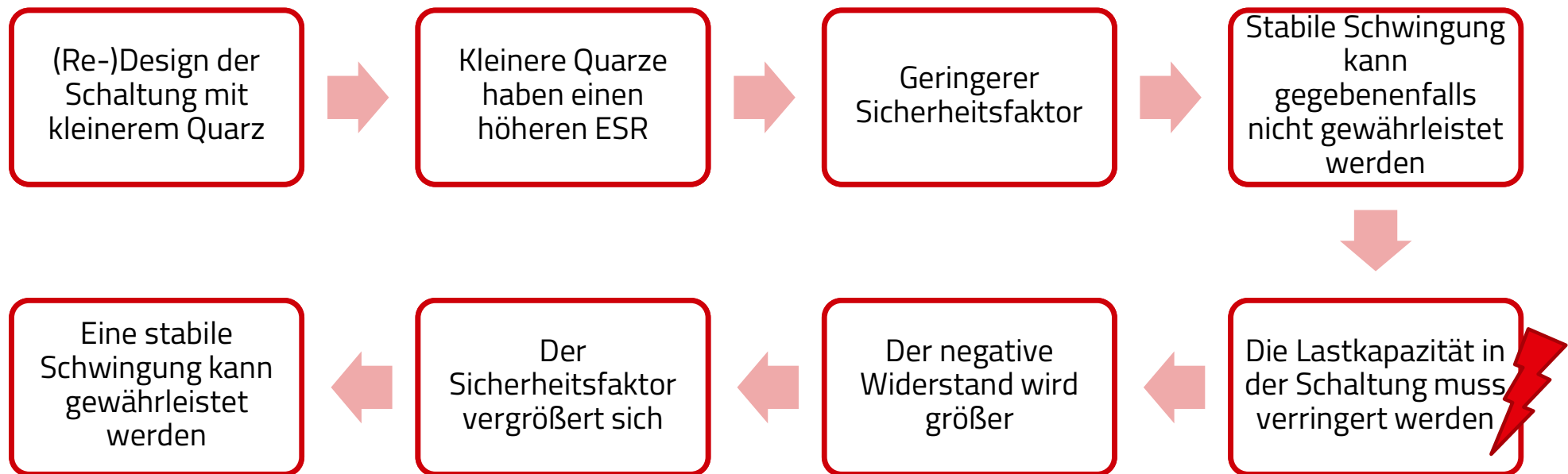
- Um den Sicherheitsfaktor (Gain Margin) zu berechnen, ohne den negativen Widerstand innerhalb der Schaltung zu messen, kann folgende Formel verwendet werden:

$$\text{gain margin} = g_m / g_{m\text{crit}}$$

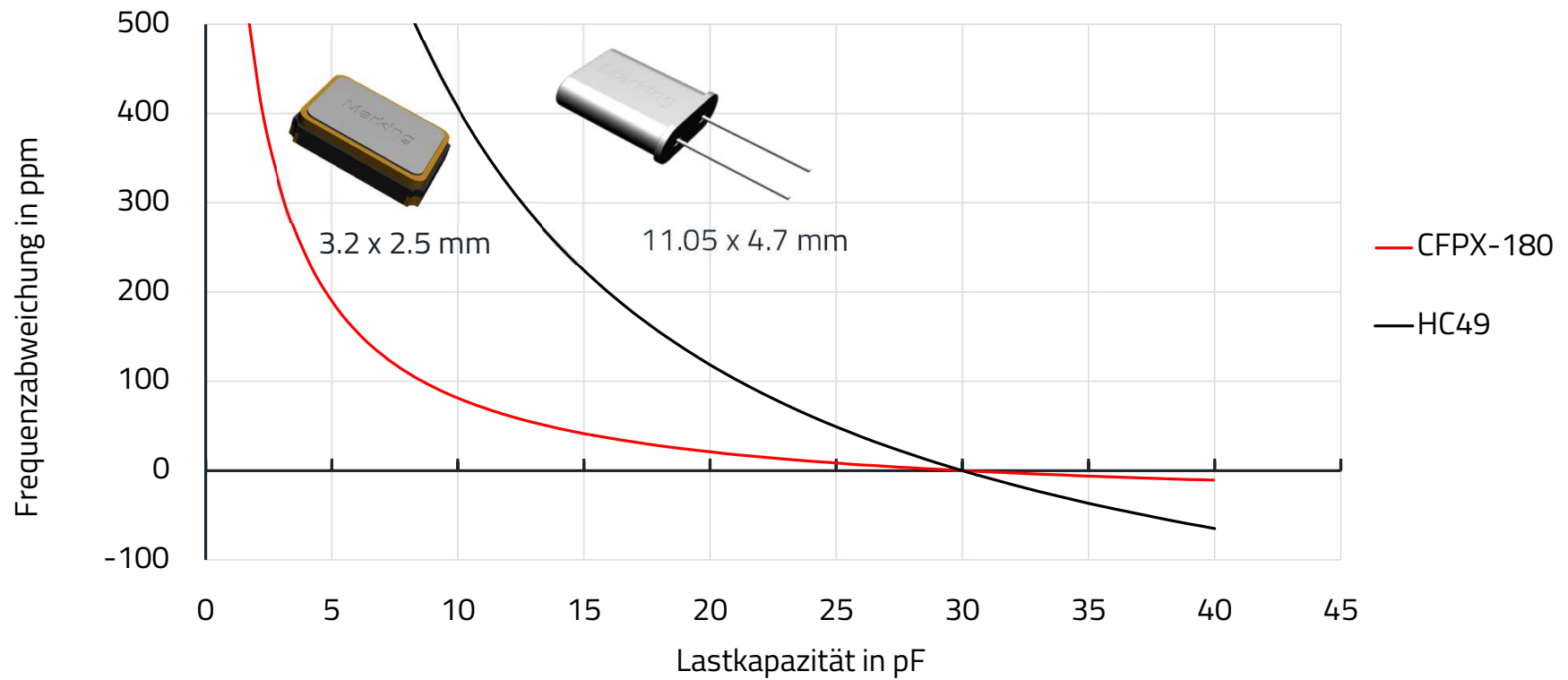
- Mit: g_m = Transconductance des Mikrokontrollers (in mA/V or $\mu\text{A/V}$)

$$g_{m\text{crit}} = 4 * ESR * (2\pi f)^2 * (C_0 + C_L)^2$$

Problem beim Design In kleiner Quarze



Frequenzänderung CFPX-180 vs. HC49



PCB Layout Empfehlungen

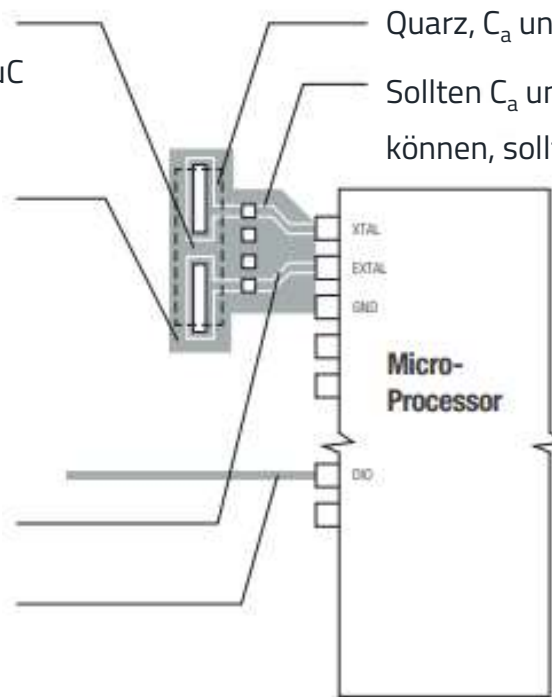
Quarze

Entweder eine freigestellte GND-Fläche unter oder ein Guardring um den Quarz:

- Verbunden mit gesondertem GND-Pin des μC und unabhängig vom restlichen GND
- C_a und C_b ebenfalls mit diesem GND verbinden
- Bei Multilayer-Leiterplatten: keine weitere GND-Fläche unter Quarz

Die Leitungen so kurz wie möglich, mit der gleichen Länge und so weit wie möglich voneinander entfernt sein

Digitale Signal-, V_S - und schnell schaltende Leitungen sollten so weit wie möglich weg sein und nicht unter dem Quarz entlangführen



Quarz, C_a und C_b so nah wie möglich am μC platzieren

Sollten C_a und C_b nicht nebeneinander angebracht werden können, sollte C_a näher am μC angebracht werden

90° Winkel sollten vermieden werden

Quarz möglichst weit entfernt von Hochfrequenzbauteilen

μC sollte stabile Versorgungsspannung haben

