

5. Quarzoszillatoren und ihre Anwendung

Dipl.Ing.W.Briese

5.1 Einleitung

Zur Erzeugung elektrischer Schwingungen stabiler Frequenz werden Quarzoszillatoren eingesetzt. Abhängig von den Umgebungsbedingungen und dem technischen Aufwand sind Frequenzgenauigkeiten von $\Delta f/f = 10^{-5}$ bis 10^{-10} /Tag erreichbar. Oszillatoren der geringeren Genauigkeitsklasse werden für Standardfrequenzen als fertige Baueinheiten angeboten. Quarzoszillatoren für höhere Genauigkeitsansprüche, oder mit speziellen Eigenschaften werden für die jeweilige Anwendung zugeschnitten angefertigt. Letztere werden in der Regel von einem Quarzhersteller dimensioniert und gefertigt, können aber auch vom Gerätekonstrukteur entwickelt werden und Teil der Schaltung auf der Leiterplatte des Gerätes sein.

5.2 Oszillatoren

In Übereinstimmung mit internationalen Normen werden Quarzoszillatoren entsprechend ihrer grundlegenden Eigenschaften und Leistungsmerkmale in vier Hauptgruppen unterschieden:

1. Einfache Quarzoszillatoren (PXO) =
(package)crystal oscillator
2. Spannungsgesteuerte Quarz-Oszillatoren (VCXO) =
voltage controlled crystal oscillator
3. Temperaturkompensierte Quarzoszillatoren (TCXO) =
temperature compensated crystal oscillator
4. Temperaturstabilisierte Quarzoszillatoren (OCXO) =
ovenized crystal oscillator

5.3 Einfache Quarzoszillatoren (PXO)

Ein Quarzoszillator ist im allgemeinen ein rückgekoppelter Verstärker, wobei im Rückkopplungsnetzwerk der Schwingquarz als frequenzbestimmendes Bauelement enthalten ist. Eine prinzipielle Oszillatorschaltung zeigt Bild 5.1. Selbsterregung tritt ein, wenn die Schleifenverstärkung größer als eins ist. Der Oszillator schwingt dann mit der Frequenz, bei der die Phasendrehung der gesamten

Schleife den Wert $2 n \pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) hat.

Das Ausgangssignal des Oszillators ist gekennzeichnet durch:

- den Mittelwert der Oszillatorfrequenz, allgemein die Arbeitsfrequenz,
- den Oberwellen der Oszillatorfrequenz, (harmonische Verzerrung, Klirrfaktor),
- den Seitenbändern der Oszillatorfrequenz,
(nichtharmonische Nebenschwingungen, Modulation)
- der Rauschbandbreite des Oszillatorsignals.

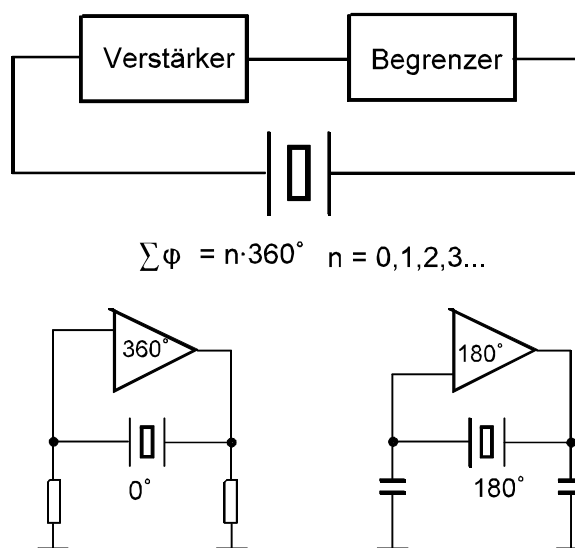


Bild 5.1 Oszillator, Prinzip

Für die Mehrzahl der Anwendungen ist die Betrachtung des Mittelwertes der Oszillatorfrequenz ausreichend. Auf das Rauschen und die Kurzzeitstabilität der Frequenz (Frequenzschwankungen im Ultrakurzzeitbereich) soll später eingegangen werden. Der Mittelwert der Oszillatorfrequenz, weiterhin nur Oszillatorfrequenz genannt, hängt also durch die Bedingung der Selbsterregung von der Phasenbedingung der Schleife ab, oder anders gesagt, jede Störung der Phasenlage der Schleife führt zu Frequenzänderungen. Störungen der Phasenlage können lokalisiert werden als:

- Veränderungen der elektrischen Parameter des Schwingquarzes.
- Veränderungen der Parameter der Oszillatorschaltung.

Der Teil a) beinhaltet die Veränderungen der Resonanzfrequenz des Schwingquarzes durch Temperatur, Temperaturgradient, Alterung, elektrische Belastung und mechanische Belastung, wie Vibration und Stöße von außen.

Der Teil b) enthält Umwelteinflüsse auf die Bauelemente der Oszillatorschaltung durch Temperatur, Feuchte, Spannungsabhängigkeit und Alterung der elektrischen Parameter sowie die Empfindlichkeit gegen mechanische Beanspruchungen. Gleich welche Ursache für die Phasenabweichung der Schleife verantwortlich ist, die hieraus resultierende Frequenzänderung ist:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta \phi}{2 Q_{\text{eff}}} \quad (1)$$

Um eine gute Frequenzstabilität zu erreichen, sind also die Phasenänderungen der Schaltung zu minimieren und die effektive Quarzgüte Q_{eff} so groß wie möglich zu halten. Die effektive Quarzgüte ist die durch die Schaltung herabgesetzte (gedämpfte) Schwingungsgüte Q des Schwingquarzes:

$$Q_{\text{eff}} = \frac{1}{\omega C_1 R_{\text{eff}}} \quad (2)$$

mit $R_{\text{eff}} = R_1 + R_i$

Unter R_i soll die Summe aller, dem Schwingquarz in Reihe liegender Widerstände verstanden werden, z. B. der Innenwiderstand des Oszillatorverstärkers und der Verlustwiderstand des Rückkoppelungsnetzwerkes, kurz der reelle Widerstand der Schleife, gemessen an den Quarzanschlußpunkten (Bild 5.2). Um die

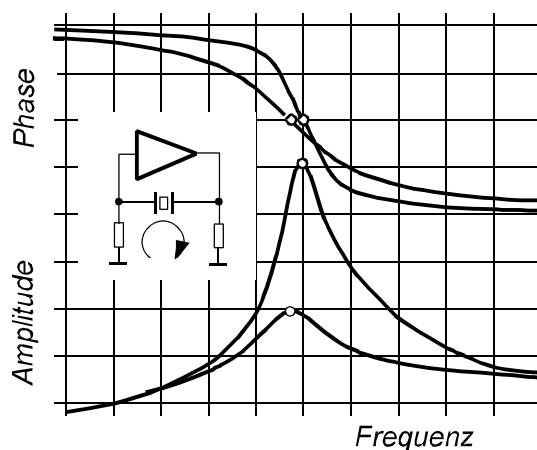


Bild 5.2 Effektive Güte

Phasenempfindlichkeit der Schaltung klein zu halten, wird die Oszillatorschaltung im allgemeinen so ausgelegt, daß der verstärkende Teil eine möglichst große Bandbreite hat, der Rückkopplungszweig mit dem Schwingquarz dagegen eine möglichst schmale Übertragungsbandbreite aufweist, damit die Schwingfrequenz im wesentlichen von den Eigenschaften des Schwingquarzes bestimmt wird. Insbesondere die obere Grenzfrequenz des Oszillatorverstärkers muß demgemäß wesentlich höher als die Betriebsfrequenz sein. Hierdurch ist die Einsetzbarkeit der häufig als Oszillatorschaltungen benutzten CMOS-, TTL-, und ECL Gatter begrenzt. Mit gleicher Vorsicht sind in Funktions-IC integrierte Quarzoszillatoren anzuwenden. Klarheit bringt sehr schnell eine Phasenmessung an der am Quarz aufgetrennten Schleife, wobei der Quarz durch einen reellen Widerstand ersetzt wird.

Die Anwendbarkeit eines Quarzoszillators wird bestimmt durch:

- Die Einstellmöglichkeit und die Einstellgenauigkeit der Frequenz auf den Sollwert
- Abweichungen der Oszillatorfrequenz durch Änderung der Umgebungstemperatur
- Die Abhängigkeit der Oszillatorfrequenz von der Betriebsspannung
- Beeinflussung der Oszillatorfrequenz durch die Lastimpedanz (Abschlußwiderstand)
- Die Langzeitstabilität
- Die Kurzzeitstabilität

Bei der Zusammenschaltung des Schwingquarzes mit der zugehörigen Oszillatorschaltung ergibt sich entsprechend der zugelassenen Toleranzen eine Abweichung der Oszillatorfrequenz vom Sollwert. Diese Abweichung liegt in der Größenordnung $\Delta f/f = \pm 20 \cdot 10^{-6} \dots \pm 100 \cdot 10^{-6}$. Ist diese Frequenzgenauigkeit nicht ausreichend, muß die Oszillatorfrequenz durch "Ziehen" mit einer variablen Lastkapazität C_L (Trimmkondensator) auf den Sollwert eingestellt werden. Dieser Trimmkondensator muß also einerseits einen genügend großen Einstellbereich haben, andererseits muß er so fein einstellbar sein und auch stabil sein, daß die erforderliche Genauigkeit (und auch Stabilität) erreicht wird.

Beispiel:

Schwingquarz $f_N = 4,000 \text{ MHz}$

stat. Kapazität $C_o = 4,5 \text{ pF}$

dynam. Kapazität $C_1 = 12 \text{ fF} (12 \cdot 10^{-3} \text{ pF})$

Mit dem Nominalwert der Lastkapazität $C_{LN} = 30 \text{ pF}$, gebildet aus der Summe der Schaltungskapazitäten (Rückkopplungsnetzwerk) $C_s = 20 \text{ pF}$, und dem Trimmkondensator $4 \dots 17 \text{ pF}$, ergibt sich der Variationsbereich der Lastkapazität

von C_{L1} bis $C_{L2} = 25 \dots 37$ pF. Mit

$$PR = D_{L1L2} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{C_1}{2} \frac{C_{L2} - C_{L1}}{(C_0 + C_{L1})(C_0 + C_{L2})} \quad (3)$$

erhalten wir die erreichbare Frequenzvariation $\Delta f/f = \pm 29 \cdot 10^{-6}$ bezogen auf den Nennwert der Lastkapazität $C_{LN} = 30$ pF. Dieser Wert ist ausreichend, um die angenommene Auslieferungstoleranz (Abgleichtoleranz) der Quarze mit $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ und die Streuung der Schaltungskapazitäten mit ± 2 pF auszugleichen. Es bleibt noch eine ausreichende Reserve, um später eine Frequenzdrift durch Alterung des Quarzes mit $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ auszugleichen. Bei einer Einstellgenauigkeit des Trimmers von $\Delta C_L = 0,2$ pF erhalten wir bei der Trimmeranfangsstellung die erreichbare Frequenzeinstellgenauigkeit $\Delta f/f$:

$$\frac{\Delta f_L}{f} = - \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)^2} \Delta C_L = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{2(4,5 + 25)^2} \cdot 0,2 = 1,4 \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

Bessere Einstellgenauigkeiten sind erreichbar durch die Verwendung von Präzisionstrimmern, die Einschränkung der Trimmervariation durch zusätzliche Festkondensatoren, die Anwendung einer größeren Lastkapazität, den Einsatz von Quarzen mit kleinem C_1 oder der Verwendung von Obertonquarzen (kleines C_1).

5.3.1 Temperaturabhängigkeit der Oszillatorfrequenz

Wenn die Bedingungen der Phasentreue und der Breitbandigkeit des Oszillatorverstärkers erfüllt sind, ist die Temperaturabhängigkeit der Frequenz allein durch den Quarz bestimmt (siehe 2.11, Bild 2.19). Werden allerdings Schaltelemente eingesetzt, die die Phasentreue des Oszillatorkreises beeinflussen, können diese den Temperaturgang erheblich verändern (siehe 2.12.5 Bild 2.30). Ähnliches gilt für integrierte Oszillatorschaltungen, die die Phasenbedingung nicht ganz erfüllen. Die im Frequenzbereich 3 MHz bis 20 MHz üblichen AT-Schnitt-Quarze haben in einem weiten Temperaturbereich besonders kleine Frequenzabweichungen, (siehe 2.12.2). Deshalb werden niedere Frequenzen vorteilhaft durch Frequenzteilung einer höheren Oszillatorfrequenz erzeugt. Oszillatoren mit niederfrequenten Quarzen zeichnen sich dagegen durch besonders geringe Stromaufnahme aus. Sie sind aber (oft in DIL-Gehäuse integriert) nicht so genau. Für höhere Ansprüche sind TCXO oder OCXO anzuwenden.

5.3.2 Dynamische Temperaturabhängigkeit

Schwingquarze reagieren auf schnelle Temperaturänderungen kurzzeitig mit größeren Frequenzänderungen als es dem Temperaturgang entspräche. Dies ist auf mechanische Spannungen im Quarzvibrator zurückzuführen, die aufgrund von Temperaturgradienten kurzzeitig entstehen, bis sich ein neues Temperaturgleichgewicht eingestellt hat Bild 5.6.

5.3.3 Die Abhängigkeit der Oszillatorfrequenz von der Betriebsspannung

Die inneren Halbleiterkapazitäten des Oszillatorverstärkers sind abhängig von der Betriebsspannung. Die Folge ist, daß sich mit einer Betriebsspannungsänderung die Phase der Schleife und demzufolge die Oszillatorfrequenz ändert. Dieses Verhalten kann zwar durch spezielle Schaltungsmaßnahmen minimiert, aber nicht vollständig kompensiert werden. Hinzu kommt eine Spannungsabhängigkeit bei großen Quarzbelastungen durch die Belastungsabhängigkeit des Schwingquarzes.

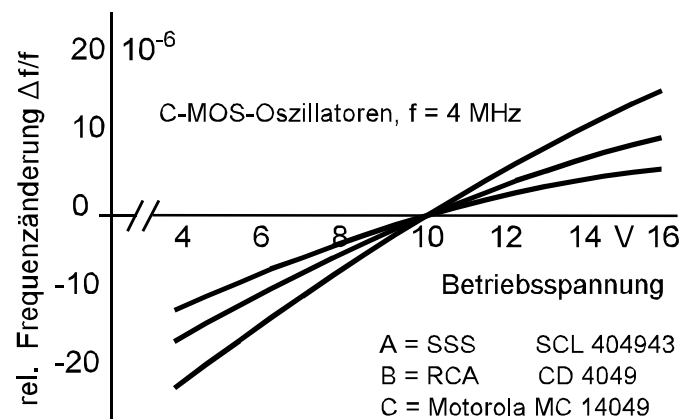


Bild 5.3 Abhängigkeit von der Betriebsspannung

Für höhere Ansprüche an die Frequenzstabilität muß die Schwingamplitude am Quarz durch eine Begrenzer-Schaltung (Fremdbegrenzung) konstant gehalten werden.

5.3.4 Einschwingzeit

Nach dem Anlegen der Betriebsspannung an den Quarzoszillator vergeht eine bestimmte Zeit, die Einschwingzeit, bis die Oszillatoramplitude ihre volle Größe

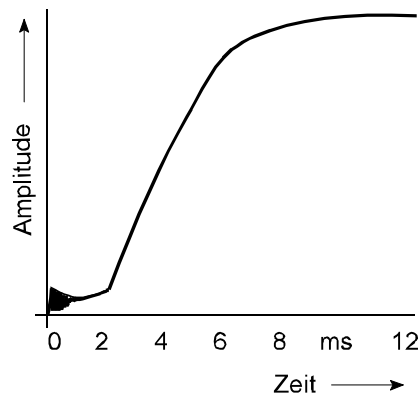


Bild 5.4 Einschwingzeit

erreicht hat. Die Einschwingzeit ist abhängig von der Schleifenverstärkung, dem Innenwiderstand des Oszillatorverstärkers und den Ersatzdaten des Schwingquarzes. Die Einschwingzeit liegt in der Größenordnung von 10 ms. Kürzere Einschwingzeiten bedeuten größere Schleifenverstärkung, kleinerer Innenwiderstand des Oszillatorverstärkers und größere dynamische Kapazität des Schwingquarzes.

5.3.5 Die Belastung des Oszillatorausganges

Wo auch immer am Oszillator eine Hochfrequenzspannung entnommen wird, man beeinflusst die Rückkopplungsschleife. Insbesondere wenn die Schleife nicht

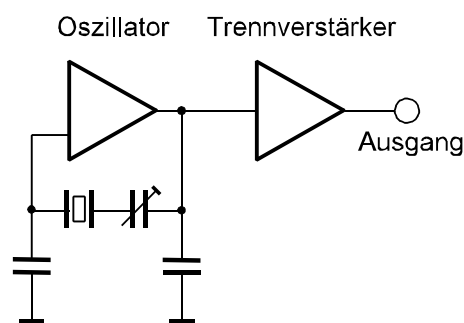


Bild 5.5 Oszillator mit Trennverstärker

reell ist oder gar bei einer Auskopplung am Schwingquarz selbst, wird man die Oszillatorfrequenz durch die Belastung mit dem Abschlußwiderstand beeinflussen. Besonders stark ist die Beeinflussung der Schwingfrequenz durch kapazitive oder induktive Belastungen. Allein die Leitungsführung und die Eingangskapazität der folgenden Schaltung und deren Unstabilitäten verursachen oft unzulässige Frequenzverwerfungen. Die kapazitive Belastung kann in ungünstigen Fällen sogar zum Aussetzen der Oszillatorschwingung oder zum wilden Schwingen der Schaltung führen. Zur Erzielung höherer Genauigkeit und vor allem bei wechselnder Belastung, ist dem Oszillator ein Trennverstärker nachzuschalten.

5.3.6 Die Langzeitstabilität

Wenn die bisher genannten Einflüsse auf die Oszillatorfrequenz eliminiert oder ausgeschlossen sind, hängt die zeitabhängige Frequenzstabilität (Alterung) hauptsächlich vom verwendeten Schwingquarz ab. Typische Alterungswerte für normale AT-Schnitt-Quarze liegen bei $\Delta f/f \pm 2 \times 10^{-6}$ im ersten Jahr. Die Alterungswerte für vorgealterte Quarze liegen deutlich darunter, für Präzisionsquarze werden Alterungswerte von $1 \times 10^{-10}/\text{Tag}$ nach dem ersten Betriebsmonat erreicht. Siehe hierzu Kapitel 2.12.11, (Alterung). Der größte Betrag der Alterung erfolgt in den ersten Tagen. Es ist deshalb sinnvoll, Oszillatoren mit den zugehörigen Quarzen für 2 bis 3 Tage bei höheren Temperaturen zu betreiben ("einzubrennen"). Nach einer, durch starke mechanische Belastungen hervorgerufenen Frequenzänderung läuft ein erneuter Alterungsprozeß ab.

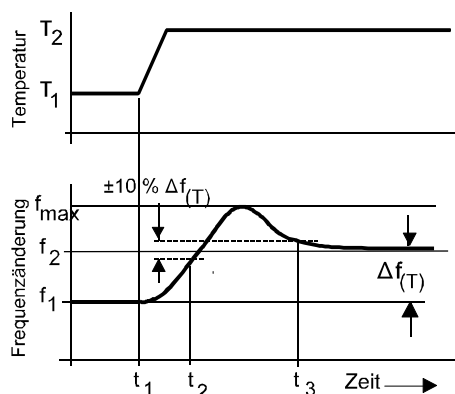


Bild 5.6 Überschwingen

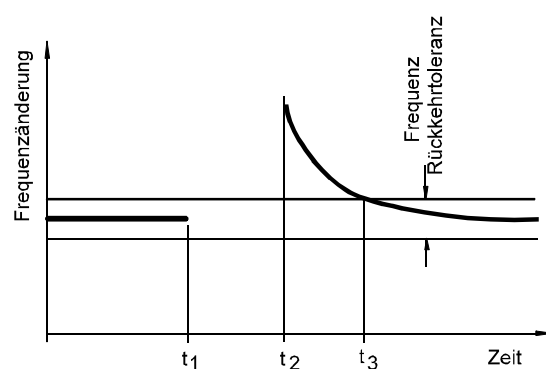


Bild 5.7 Wiedereinlauf

Bei den für Präzisionsquarzen üblichen Alterungswerten von $\Delta f/f = 10^{-8}$ bis 10^{-10} , aber auch bei TCXO deutlich sichtbar, erfolgt nach einer plötzlichen Temperaturänderung ein Überschwingen (Bild 5.6) und ein Wiedereinlaufen (Bild 5.7). Ebenso erfolgt nach jeder Betriebsunterbrechung ein erneuter

"Wiedereinlauf" der Frequenz. Genauere Oszillatoren werden deshalb in einer "Stand by"-Schaltung bei Betriebsunterbrechungen weiterbetrieben. Bei einfachen Oszillatoren ist die Frequenzalterung meist vernachlässigbar klein gegenüber der Temperaturabhängigkeit.

5.3.7 Festlegung von Oszillatorparametern

Für die Anwendung von Oszillatoren müssen deren Eigenschaften fest umrissen werden. Die untenstehende Auflistung von Oszillatorkennwerten soll einen Überblick über zu spezifizierende Kenndaten geben. Sie gelten für alle Oszillatorarten. Spezielle, zusätzliche Daten für VCXO, TCXO und OCXO sind den speziellen Abschnitten beigelegt.

Es hängt von der jeweiligen Anwendung ab, welche der aufgelisteten Kenndaten spezifiziert werden müssen. Oft schließen sich einige Parameter gegenseitig aus oder es muß ein Kompromiß gefunden werden. Aus Kostengründen heißt es auch hier: so wenig wie möglich, aber so viel wie nötig angeben.

5.3.8 Typische Oszillatorkennwerte

Frequenz:

- . 1 Nennfrequenz, die Frequenz, nach der der Oszillator benannt ist
 - . 2 Frequenztoleranz, die maximal zulässige Abweichung von der Nennfrequenz unter bestimmten Betriebsbedingungen.
 - . 3 Frequenztoleranz bei der Bezugstemperatur
 - . 4 Temperaturbedingte Frequenzänderung im Arbeitstemperaturbereich
 - . 5 Frequenzänderung in Abhängigkeit von der Betriebsspannung oder dem Betriebsspannungsbereich, in dem . 3 gilt.
 - . 6 Frequenz in Abhängigkeit von der Zeit (Alterung)
 - . 7 Frequenzänderung durch Belastung, nach Betrag und Phase, bzw. Angabe der Nennbelastung
 - . 8 Frequenzänderung bzw. Modulation während mechanischer Belastungen wie z. B. Vibration
- * oft wird es ausreichen, eine Gesamttoleranz für .1 bis .8 anzugeben

Stromversorgung:

- . 9 Nennspannung und zul. Spannungsbereich, Stabilisierung und Welligkeit
- . 10 Polung, eventl. Verpolsicherheit, Überspannungsfestigkeit (max. zul. Spannungsspitzen)

. 11 Stromaufnahme oder Leistung

Ausgangseigenschaften:

- . 12 Kurvenform
- . 13 Amplitude bzw. Leistung an definierter Belastung (Nennbelastung)
- . 14 Innenwiderstand
- . 15 Klirrfaktor
- . 16 Nebenschwingungen (Störmodulation)
- . 17 Signal-Rauschabstand

Frequenzverhalten:

- . 18 Einlaufdauer nach Betriebspausen
- . 19 Wiederholgenauigkeit nach Betriebspausen (Wiedereinlauf)
- . 20 Frequenzziehbereich
- . 21 Einstellgenauigkeit
- . 22 Langzeitstabilität
- . 23 Kurzzeitstabilität

Umgebung:

- . 24 Temperaturbereich für Lagerung und Betriebsfähigkeit
- . 25 max. zul. Schock, Vibration, Beschleunigung bei Transport und Betrieb

5.4 Spannungsgesteuerte Quarzoszillatoren (VCXO)

Oft besteht die Forderung, die Frequenz eines Quarzoszillators durch Variieren einer angelegten Gleichspannung statisch zu steuern. Meist zur Synchronisation

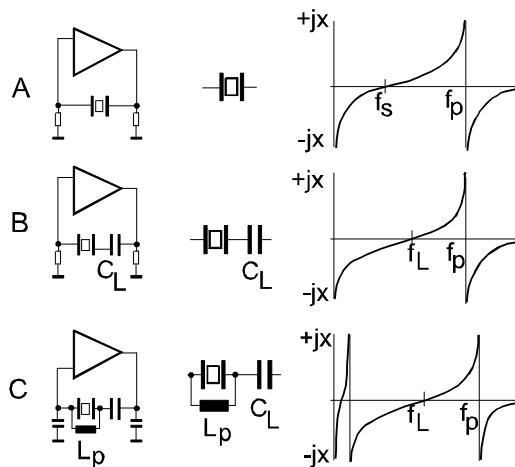


Bild 5.8 Ziehen der Oszillatorfrequenz

der an sich schon recht genauen Frequenz. Aber auch eine dynamische Steuerung

der Frequenz, durch eine Wechselspannung zur Frequenzmodulation des Signals wird mit VCO's bewirkt. Bei Quarzoszillatoren wird allgemein eine Frequenzänderung der Oszillatorfrequenz durch Variation eines dem Schwingquarz in Reihe liegenden Lastkondensators C_L erzielt. Die (theoretisch) maximale Frequenzvariation liegt zwischen f_s und f_p . Dieser max. Variationsbereich kann durch Kompensation der Parallelkapazität C_0 des Quarzes mit einer zusätzlichen Induktivität erweitert werden (Bild 5.8).

für Bild 5.8 B gilt:

$$f_L = f_s \left(1 + \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \right) \quad (5)$$

Für Bild 5.8 C gilt:

$$L_p = \frac{1}{\omega^2 C_0} \quad f_{1,2} \approx \left(1 \pm \sqrt{\frac{C_1}{C_0}} \right) \quad (6)$$

Ersetzt man den, dem Schwingquarz in Reihe liegenden, Lastkondensator C_L durch eine Kapazitätsdiode, kann die Arbeitsfrequenz des Oszillators durch die Vorspannung der Kapazitätsdiode gesteuert werden (Bild 5.9).

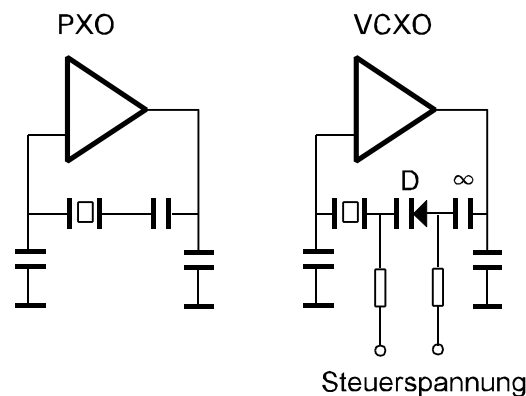


Bild 5.9 Frequenzsteuerung bei VCXO

Die Nichtlinearität der Ziehempfindlichkeit des Quarzes wird größtenteils durch die gegenläufige Nichtlinearität der Kapazitätsdiode kompensiert. Weitere Linearisierungen sind durch Reihen- oder Parallelschaltungen einer Induktivität zum Quarz möglich. (Bild 5.8). Im Interesse eines großen Frequenzhubes, sind Schwingquarze mit großer dynamischer Kapazität C_1 einzusetzen.

Das Kapazitätsverhältnis $r = C_0/C_1$ soll möglichst klein sein, hier gilt es, parallel

zu C_0 liegende Kapazitäten zu vermeiden.

Frequenz	Ordnung des Obertones	r	C_1
2 MHz	Grundton	300...400	10 fF
4 MHz	Grundton	250...350	8...20 fF
8 MHz	Grundton	230	15...25 fF
16 MHz	Grundton	220	20...25 fF
30 MHz	3.Oberton	2500	1...2 fF
60 MHz	3.Oberton	2500	1...2 fF
60 MHz	5.Oberton	5700	0,5...0,7 fF
120 MHz	7.Oberton	12000	0,2...0,3 fF

Typische Werte von AT-Schnitt-Quarzen

Bei hohen Frequenzen, für die nur Obertonquarze erhältlich sind, wird der Frequenzhub wegen der kleinen C_1 -Werte für viele Anwendungen zu klein. In diesen Fällen muß mit Oszillatoren im Grundtonbereich gearbeitet werden und durch die Vervielfachung der Frequenz, der Hub mit vervielfacht werden.

5.4.1 Typische Oszillatorkennwerte für VCXO

Zusätzlich zu den in 5.3.8 aufgeführten Oszillatorkennwerten sind für die Charakterisierung von VCXO's die nachfolgenden Angaben gebräuchlich:

- Der Nennwert des Frequenzhubes ist der Frequenzhub, auf den die charakteristischen Daten des Oszillators bezogen werden.
- Der maximale Frequenzhub wird meist auf einen festgelegten Klirrfaktor und eine festgelegte Modulationsfrequenz bezogen
- Die Frequenzmodulationssteilheit ist definiert als

$$\Delta f / U = \frac{\text{Frequenzhub}}{\text{Modulationseingangsspannung}} \quad (7)$$

gemessen bei festgelegter Modulationsfrequenz und dem Nennwert des Frequenzhubes. Weniger gebräuchlich ist die Angabe der Modulationseingangsspannung, die den Nennwert des Frequenzhubes bewirkt.

- Frequenzbereich der Modulationsspannung
Angabe der maximalen und minimalen Modulationsfrequenz, bei der die Modulationssteilheit auf einen angegebenen Wert abfällt (z.B. um 3 dB).
Oder die Angabe des maximalen Modulationsindex m_F

$$m_F = \frac{\text{Hub}}{\text{Modulationsfrequenz}} \quad (8)$$

- Angabe der maximalen übertragbaren Flankensteilheit bei PCM-Anwendung.
- Frequenzgang der Frequenzmodulation.
Änderung der Frequenzmodulationssteilheit in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz
- Störfrequenzmodulation
Frequenzhub bei vorgeschriebenem Abschluß des Modulationseinganges, jedoch ohne Modulationseingangsspannung. Angabe in dB bezogen auf den Nennwert des Frequenzhubes. Die Störfrequenzmodulation ist meist verursacht durch Netzbrummen oder Rauschen des Netzteiles.
- Impedanz des Modulationseinganges
- Nichtlinearität der Modulationskennlinie
Die Nichtlinearität ist die Abweichung der Übertragungskennlinie des Modulators (VCXO) von einer Geraden.

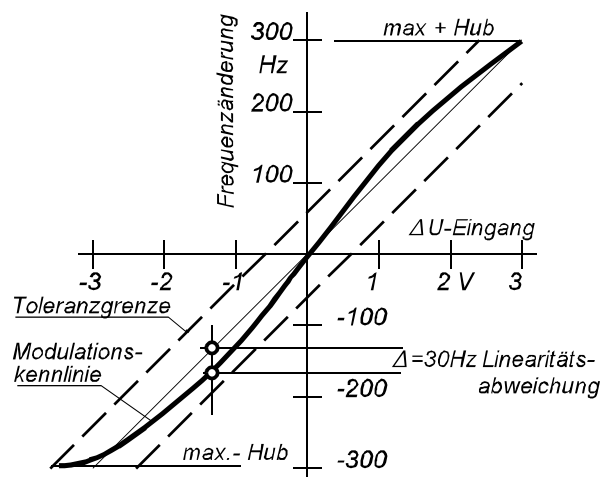


Bild 5.10 Frequenzmodulationskennlinie

Die Abweichung der Modulationskennlinie von der Idealkennlinie wird in % des Modulationshubes angegeben (Bild 5.10). Die Nichtlinearität kann auch

als Verzerrung der Modulation angegeben werden. Man unterscheidet zwischen der statischen und der dynamischen Prüfung der Modulationsverzerrungen. Bei der statischen Prüfung wird der Modulationseingang mit einer Gleichspannung beaufschlagt. Die Abweichung von der Proportionalität zwischen Frequenzhub und Modulationsgleichspannung ist die Modulationsverzerrung. Bei der dynamischen Prüfung wird ein sinusförmiges Signal einer festgelegten Frequenz und Amplitude auf den Modulationseingang gegeben. Die Verzerrung des Ausgangssignals wird nach der Demodulation mit einem Klirrfaktormesser bestimmt.

5.4.2 Typische Daten von VCXO

Frequenzbereich	2 ... 100 MHz
Frequenzmodulationssteilheit	10 ... 200 $10^{-6}/V$
Nichtlinearität	0,1 ... 5 % (Klirrfaktor)
maximaler Modulationshub im Bereich der Quarze im	
	Grundton $350 \cdot 10^{-6}$
	3. Oberton $40 \cdot 10^{-6}$
	5. Oberton $15 \cdot 10^{-6}$
	7. Oberton $7 \cdot 10^{-6}$
	9. Oberton $5 \cdot 10^{-6}$
Frequenzstabilitäten	$1 \cdot 10^{-4}$... $5 \cdot 10^{-6}$

5.5 Temperaturkompensierte Quarzoszillatoren (TCXO)

Die Temperaturabhängigkeit der Oszillatorfrequenz ist bei einfachen Oszillatoren durch den Temperaturgang der Quarze gegeben (Bild 2.19). Auch bei der Verwendung von AT-Schnitt-Quarzen sind der Minimierung des Temperaturganges durch die physikalischen Konstanten des Materials Quarz Grenzen gesetzt (Bild 2.26). Werden kleinere Werte des Temperaturganges gefordert, kann der Temperaturgang des Quarzoszillators mit einer elektrischen Schaltung kompensiert werden (TCXO = Temperature-Compensated-Xtal-Oszillator).

5.5.1 Analoge TCXO

Die Kompensation des Temperaturganges eines Quarzoszillators erfolgt durch die temperaturabhängige Steuerung eines VCXO. Dem Modulationseingang wird eine Steuerspannung (Modulationsspannung) zugeführt, die dem Temperaturgang

der Quarzfrequenz genau entgegenwirkt. Die Steuerspannung wird in einem temperatursensitiven Netzwerk erzeugt (Bild 5.11 und 5.12). Als Temperatursensoren werden meist NTC-Widerstände (Thermistoren) verwendet. Mit einfachen Netzwerken, bestehend aus Festwiderständen und einem oder zwei NTC-Widerständen, können nur annähernd lineare Temperaturabhängigkeiten kompensiert werden.

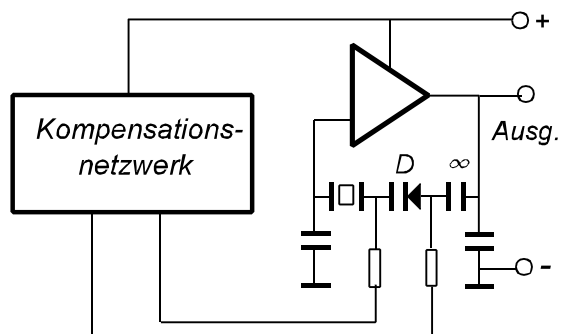


Bild 5.11 Analoge TCXO

Aus diesem Grund werden für TCXO mit einfacher Kompensation Quarze verwendet, deren Frequenz-Temperatur-Umkehrpunkte außerhalb des Arbeitstemperaturbereiches liegen, oder es wird nur ein Umkehrpunkt in die

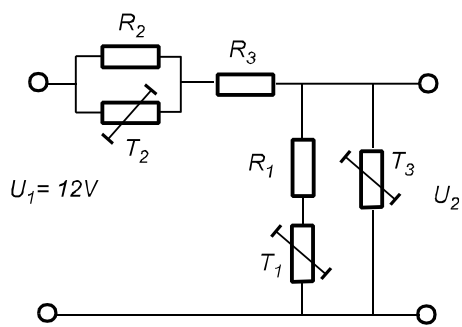


Bild 5.12 TCXO

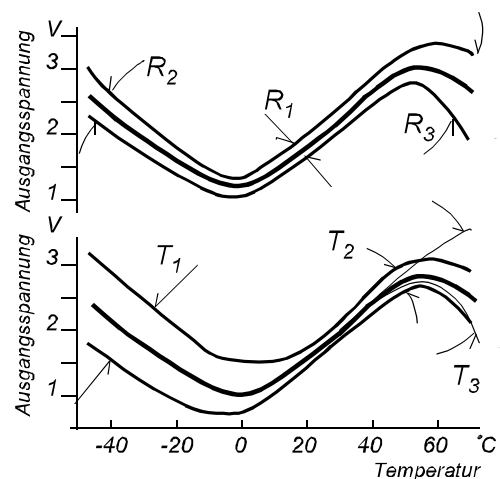


Bild 5.13 Wirkung der Einzelemente nach Bild 5.12

Kompensation einbezogen. Allerdings haben AT-Schnitt-Quarze mit weit voneinander entfernten Umkehrpunkten auch einen relativ großen Temperaturgang der Frequenz, der zu kompensieren ist. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an die Stabilität des Kompensationsnetzwerkes. Eine sorgfältige Stabilisierung der Speisespannung und die Auswahl langzeitstabiler Bauelemente für das Netzwerk

sind erforderlich. Auch der Auswahl der zu verwendenden Schwingquarze kommt eine erhöhte Bedeutung zu: etwaige Diskontinuitäten im Frequenz-Temperaturverhalten, sonst kaum bemerkbar, treten nach der Kompensation voll in Erscheinung. Diese Diskontinuitäten treten meist erst bei größeren Quarzbelastungen auf, was bei der Auslegung der Schaltung bereits berücksichtigt werden kann. Weiterhin störend sind Überschwingen der Quarzfrequenz bei plötzlichen Temperaturänderungen und Hystereseerscheinungen. Gegen plötzliche Temperaturänderungen ist der TCXO-Baustein mit einem eigenen Gehäuse, evtl. mit wärmeisolierender Auskleidung zu versehen und im Gerät an einer temperatugeschützten Stelle zu montieren. Gegen Hysterese sind die Thermistoren in einem guten Wärmekontakt mit dem Quarz anzuordnen. Aufgrund der Streuung der Temperaturgänge von Quarz und Oszillatorschaltung, werden die Werte für das Kompensationsnetzwerk individuell, entsprechend der durchgeführten Messungen, errechnet. Eine Reparatur ist also ohne Neurechnung des Netzwerkes nicht möglich.

5.5.2 Digitale TCXO

Die Temperatur des Schwingquarzes wird wieder mit einem Temperaturfühler (z.B. PT100) gemessen und, der durch A/D-Wandler digitalisierte Wert einem

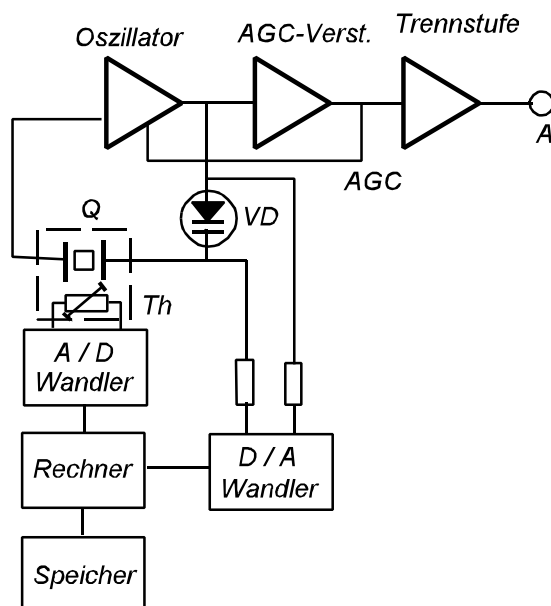


Bild 5.14 Digitaler TCXO

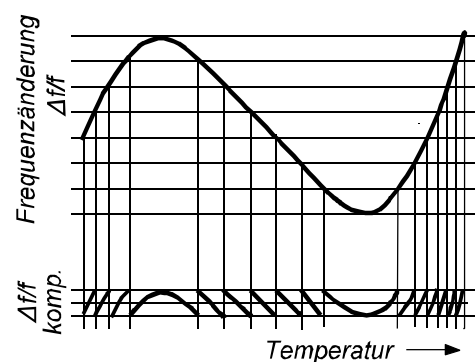


Bild 5.15 Digitale Kompensation

Rechner zugeführt. Entsprechend der im Speicher abgelegten Meßwerte wird

ein zur Kompensation des Temperaturganges erforderlicher digitaler Spannungswert auf den D/A- Wandler gegeben, der einen entsprechenden analogen Spannungswert zur Steuerung der Kapazitätsdiode ausgibt (Bild 5.14).

Mit dieser Methode können beliebige Kurvenformen und damit große Temperaturbereiche kompensiert werden. Je nach Anzahl der verfügbaren Speicherplätze wird die kompensierte Temperaturabhängigkeit der Frequenz mehr oder weniger große Sprünge aufweisen. Zur Ermittlung der Tabellenwerte im Speicher wird man sich auf einige wenige Temperaturmessungen beschränken und die für die Tabelle erforderlichen Zwischenwerte mit einem Rechner entsprechend der Gleichung des Temperaturganges

$$\frac{\Delta f}{f} = a(\Delta T) + b(\Delta T)^2 + c(\Delta T)^3 \quad (9)$$

ermitteln. Für hohe Ansprüche wird der Rechner als Mikroprozessor gleich in das System einbezogen. Statt der Tabellenwerte werden jetzt die exemplarischen Konstanten der Gleichung in den Speicher gegeben. Die Regelspannung wird fast kontinuierlich in Abhängigkeit von der Temperatur errechnet und über den D/A-Wandler der Varaktordiode zugeführt. Die theoretische Grenze der Kompensation ist durch die Quantisierung der Temperaturschritte und der Schritte der Analogspannung durch den D/A-Wandler gegeben.

Analoge TCXO haben den Vorteil geringerer Stromaufnahme, digitale TCXO den Vorteil eines größeren Temperaturbereiches.

5.5.2.1 Die mit TCXO erreichbaren Frequenzgenauigkeiten

Die mit TCXO - Schaltungen erreichbaren Genauigkeiten liegen in etwa bei:

Temperaturbereich	Frequenzänderung $\Delta f/f$
0... 50 °C	0,2...1 x 10 ⁻⁶
-20... 70 °C	0,2...2 x 10 ⁻⁶
-40... 90 °C	0,3...3 x 10 ⁻⁶
-55...105 °C	0,5...5 x 10 ⁻⁶

Die kleineren Werte der Frequenzänderung gelten jeweils für digitale TCXO, die größeren Werte für analoge Schaltungen. Der Übergang ist schleifend.

Die Leistungsaufnahme der TCXO liegt bei etwa 20...200 mW.

Mit rechnergesteuerten TCXO können etwa um eine Zehnerpotenz bessere Werte, als eben angegeben, erreicht werden. Der Aufwand wird jedoch unrentabel hoch. Zu erwartende Diskontinuitäten der Temperaturgänge geeigneter Quarze liegen bereits in der Größenordnung von 0,2 ppm und das Überspringen der Quarzfrequenz bei schnellem Temperaturwechsel in der Größenordnung 0,5 ppm. TCXO der höheren Genauigkeitsklasse sind also vor schnellen Temperaturänderungen zu schützen. Sonst gelten die entsprechenden Vorkehrungen wie bei VCXO: gute Siebung der Stromversorgung und besonders gute Stabilisierung der Betriebsspannung, weil Spannungsänderungen über das Kompensationssystem in besonders starkem Maß auf die Oszillatorfrequenz einwirken. Nachdem nun die Frequenzgenauigkeit durch den Temperaturgang kompensiert ist, gewinnen die Parameter Alterung, Wiederkehrgenauigkeit und Einlaufzeit erheblich an Bedeutung.

5.6 Temperaturstabilisierte Quarzoszillatoren (OCXO)

Bei höheren Anforderungen an die Frequenzstabilität ist der Schwingquarz, oder auch der Quarz mit der zugehörigen Oszillatorschaltung bei einer konstanten Temperatur zu betreiben, d. h. in einem Thermostaten zu betreiben. Auch bei

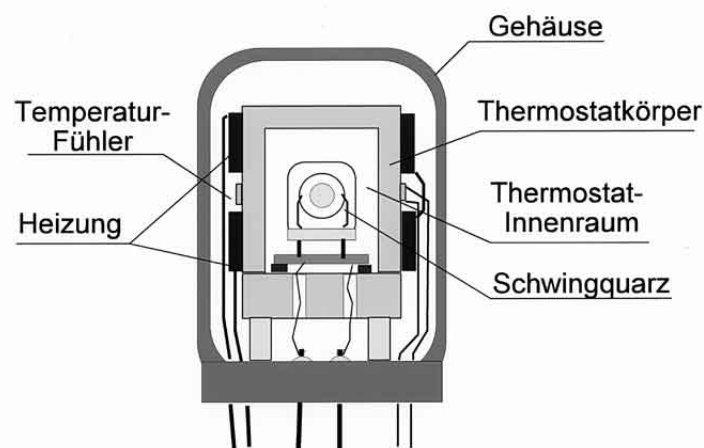


Bild 5.16 Einfachthermostat, Aufbau

aufwendiger Temperaturregelung des Thermostaten bleibt eine geringe Temperaturschwankung (Welligkeit) erhalten. Zur Minimierung der hieraus resultierenden Frequenzänderungen, ist die Thermostat-Temperatur auf die Temperatur des Umkehrpunktes der T_k -Kurve des jeweiligen Quarzes einzustellen. Die Regelung eines normalen Thermostaten basiert auf der Wärmeabgabe an

die kühlere Umgebung. Die Thermostatterperatur muß also deutlich über der höchsten Betriebstemperatur des Gerätes liegen. Andererseits ist bei höheren Temperaturen eine größere Alterung zu erwarten (siehe 2.12.11) und die durch die Welligkeit der Temperaturregelung verbleibende Frequenzschwankung wird größer (Bild 2.27).

5.6.1 Aufbau einstufiger Thermostate

In Bild 5.16 ist der prinzipielle Aufbau eines einstufigen Thermostaten zur Temperaturregelung eines Schwingquarzes dargestellt. Der Thermostat besteht aus der temperierten Thermostatkammer, die den Schwingquarz oder auch den kompletten Quarzoszillator enthält, dem Thermostatkörper, den Temperaturfühler, der Heizung und der Regelschaltung (Bild 5.17). Um die Wärmeabfuhr nach außen zu vermeiden und die Auswirkung schneller äußerer Temperaturänderungen zu minimieren, befindet sich diese Anordnung in einem Thermogehäuse. Zum Betrieb des Thermostaten wird noch die Regelschaltung benötigt, die die erforderliche Wärmezufuhr regelt. Die Temperaturregelschaltung besteht aus Temperaturfühler, Verstärker mit Leistungsstufe und der Heizvorrichtung. Die Temperaturfühler sind in

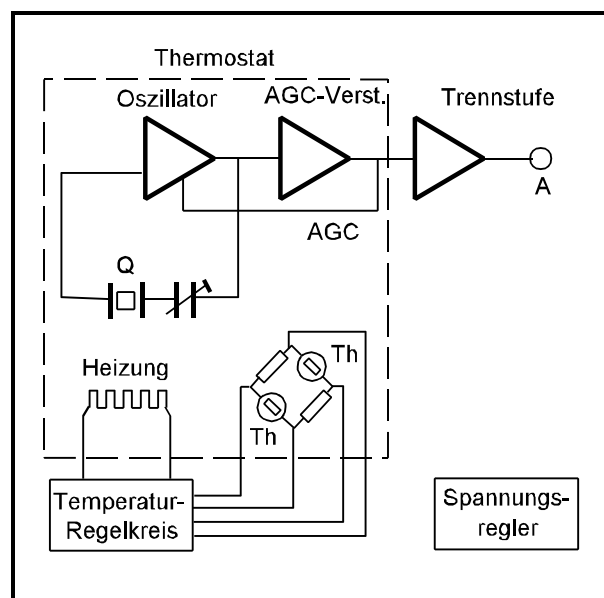


Bild 5.17 Thermostat,
Prinzip der Regelschaltung

in einer Brückenschaltung angeordnet. Abweichungen von der Solltemperatur führen zu einem Ungleichgewicht dieser Temperaturmeßbrücke, die hieraus resultierende Brückenspannung wird verstärkt der Heizvorrichtung zugeführt. Damit wird erreicht, daß bei großen Temperaturunterschieden eine entsprechend

große Heizleistung erzeugt wird (Anheizen) und in der Nähe der Solltemperatur nur eine geringe Heizleistung zur Deckung der Wärmeverluste erzeugt wird. Mit den Brückenwiderständen kann die Temperatur, mit der Verstärkung das Regelverhalten des Thermostaten eingestellt werden. Bei kleinen Thermostaten wird zur Heizung die Verlustwärme eines Leistungstransistors genutzt. Bei einem hohen Verstärkungsfaktor dieses Transistors kann die Heizung nahezu verlustlos geregelt werden. Der Transistor befindet sich in einem guten Wärmekontakt zum Thermostatkörper. Die Schwingquarze sind empfindlich gegen Temperaturgradienten. Die von der Temperaturregelung erzeugte Temperaturwelligkeit kann deshalb größere Frequenzschwankungen hervorrufen, als es dem Temperaturgang des Quarzes entspräche. Diese Frequenzänderungen sind besonders

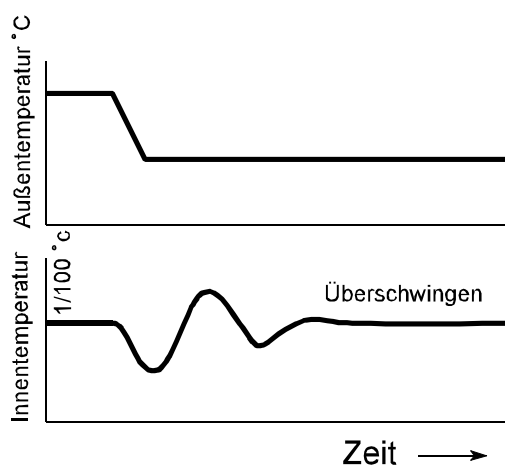


Bild 5.18 Einlauf eines Thermostaten

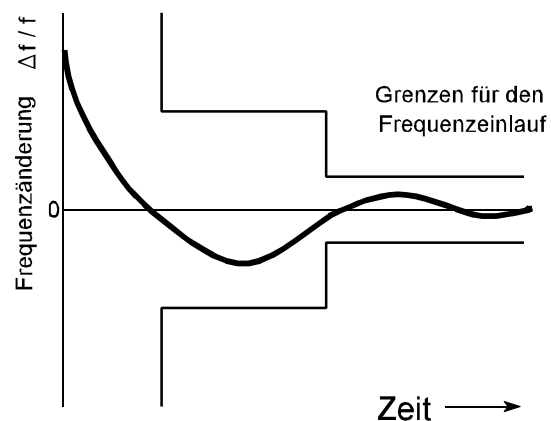


Bild 5.19 Überschwingen der Frequenz

groß, wenn die Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur groß ist. Thermostate mit großer Wärmekapazität und geringen Wärmeverlusten haben im allgemeinen eine kleine Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur. Große Wärmekapazität bedeutet allerdings auch eine lange Aufheizzeit nach dem Einschalten des Thermostaten. Deshalb erhalten Thermostate häufig eine zweite Hilfsheizung mit hoher Heizleistung, die direkt unterhalb der Solltemperatur abgeschaltet wird. Eine kurze Aufheizzeit bedeutet in den meisten Fällen ein Überschwingen der Innentemperatur des Thermostaten und außerdem ein Überschwingen des Frequenzeinlaufes des Schwingquarzes (Bild 5.19). Es hat also keinen Sinn, die Einlaufzeit extrem kurz zu machen. Präzisionsquarze sehr hoher Genauigkeit und kleiner Frequenzalterung im Bereich von $\Delta f/f = 10^{-9}$ /Tag reagieren auf Betriebsunterbrechungen mit einem "Wiedereinlauf" der Frequenz. Der Wiedereinlauf kann einige Stunden dauern, er kann im Genauigkeitsbereich von 10^{-10} mehrere Tage dauern, bis der Quarz auf die ursprüngliche Frequenz wieder eingelaufen ist. Bei Abschalten eines Gerätes hoher Frequenzgenauigkeit läuft dann der Thermostat mit dem Quarzoszillator im "stand by"-Betrieb weiter.

Um die durch Thermostatbetrieb ermöglichte Frequenzgenauigkeit voll auszuschöpfen, wird die Oszillatorschaltung ebenfalls im Thermostaten untergebracht. Die Amplitudenregelung des Oszillators wird für diesen Genauigkeitsanspruch eine Fremdregelung sein (AGC = automatic gain control), die der nachgeschalteten Pufferstufe entnommen wird (Bild 5.17).

Die mit Einfachthermostaten erreichbaren Frequenzgenauigkeiten liegen bei

Temperaturbereich °C	Frequenzgenauigkeit $\Delta f/f$
-55...105	$0,1...2 \times 10^{-7}$
-40... 90	$0,1...1 \times 10^{-7}$
-20... 70	$0,05...1 \times 10^{-7}$
0... 50	$0,05...0,5 \times 10^{-7}$

typische Werte für die Einlaufzeit:

Zeit nach dem Einschalten:	Frequenzfehler:
10 Min	$1 \cdot 10^{-6}$
30 Min	$0,1 \cdot 10^{-6}$
120 Min	Toleranz

5.6.2 Zweistufige Thermostate

Werden noch höhere Temperaturstabilitäten gefordert, sind Doppelthermostaten einzusetzen. Hierbei wird die Umgebungstemperatur für den Innenthermostat durch einen einfachen Außenthermostaten vorgeregelt.

Regelgüten von 10^4 sind üblich. Die mit Doppelthermostaten temperaturstabilisierten Präzisionsquarzoszillatoren erreichen Frequenzgenauigkeiten von:

Temperaturbereich	Frequenzgenauigkeit $\Delta f/f$
-55...105 °C	$3 \cdot 10^{-9}$
-40... 90 °C	$1 \cdot 10^{-9}$
-20... 70 °C	$0,5 \cdot 10^{-9}$
0... 50 °C	$0,1 \cdot 10^{-9}$

5.6.3 Bestellangaben für den Thermostaten des OCXO

- .1 Nenntemperatur
- .2 Arbeitstemperaturbereich
- .3 Temperaturbereich der Lagerfähigkeit
- .4 Einstellbereich der Innentemperatur
- .5 Einstellgenauigkeit der Innentemperatur
- .6 Alterung der Innentemperatur
- .7 max. Änderung der mittleren Innentemperatur im Arbeitstemperaturbereich
- .8 Welligkeit der Innentemperatur
- .9 Einlaufzeit
- .10 Maximales Überschwingen der Innentemperatur bei plötzlichen Änderungen der Außentemperatur
- .11 Zulässige Änderung der Umgebungstemperatur ohne Überschwingen der Innentemperatur .
- .12 Betriebsspannung
- .13 max. Heizleistung (Aufheizen)

5.7 Literatur

DIN 45174 Teil 1, Quarz-Oszillatoren, Begriffe
DIN 45174 Beiblatt 1 zu Teil 1
DIN 45174 Teil 2 Quarzoszillatoren, Prüfungen
DIN 45175 Leitfaden "Quarz-Oszillatoren"
DIN 45172 Schwingquarz-Thermostate

Frerking, Marvin E.

Crystal Oscillator Design and Temperature
Compensation, Van Nordstrand-Reinhold Company, 1978

Neubig, B.

Schwingquarze in der Oszillatorschaltung,
Referate des ZVEI-Symposiums Quarze 1985, ZVEI-Fach-
band Bauelemente der Elektronik, Vistas-Verlag Berlin

Parzen und Ballato

Design of Crystal and Other Harmonic Oscillators
John Wiley & Sons, New York, 1978

Matthys, Robert J.

Crystal Oscillator Circuits
John Wiley & Sons, New York, 1983

Gerber - Balloto,

Precision Frequency Control (2 Bände)
Academic Press, Inc. New York, 1985

A. van der Ziel,

Noise,
Prentice-Hall, Inc. New York, 1954

P. Kartaschoff, J. A. Barnes, Standard Time and Frequen-
cy Generation, Proc. IEEE, vol. 60, Mai 1972, S. 494

Allan, D. W. Statistics of Atomic Frequency Standards,
Proc. IEEE, Vol. 54, Febr. 1966, S. 221-230