



Temperaturstabilisierter Quarzoszillator OCXO 400 Teil 1

In zeitkritischen Anwendungen reicht die Frequenzstabilität eines herkömmlichen Quarzoszillators nicht aus. Mit einer zusätzlichen Temperaturstabilisierung wird aus einem Quarzoszillator ein OCXO mit minimierter Temperaturabhängigkeit. Der ELV OCXO 400 zeichnet sich durch seine guten technischen Daten und den kompakten Aufbau aus. Dieser erste Teil des Artikels beschäftigt sich zunächst mit den Grundlagen der Signalerzeugung und einem kurzen Überblick über verschiedene Resonatoren und anschließend mit den speziellen Ausführungen der Quarzoszillatoren.

Allgemeines

Die Erzeugung von harmonischen Signalen gehört zu den grundlegenden Aufgaben in der Elektronik. Eine entsprechende Oszillatorschaltung generiert dabei das Signal in der von der Anwendung abhängigen Signalform. So werden beispielsweise intern erzeugte Sinus-, Rechteck- oder Dreieckssignale in fast jedem elektronischen Gerät für die ordnungsgemäße Funktion benötigt. Ein Fernsehgerät besitzt beispielsweise ei-

nen Sinusgenerator im Tuner, d. h. im Empfangsteil, um mittels Frequenzmischung den gewünschten Sender zu empfangen. Im Ablenkteil sorgt ein Dreieck- bzw. Sägezahn-generator für die zeilenweise Ablenkung des Elektronenstrahles und ein Rechteckgenerator sorgt für die Bereitstellung des Taktsignales der Prozessorsteuerung.

Für die Erzeugung der Signale gibt es verschiedene Oszillatortypen mit unterschiedlichen Resonanzelementen, die in einem kurzen Abriss beschrieben werden. Dabei beschränken wir uns auf die Oszilla-

toren zur Erzeugung einer Sinusschwingung, die im Idealfall folgendes Ausgangssignal liefern:

$$U_a(t) = \hat{U} \cdot \cos(\omega t)$$

Nahezu alle „digitalen“ Oszillatoren, d. h. Oszillatoren mit einem rechteckförmigen Ausgangssignal, lassen sich auf solche Sinusoszillatoren zurückführen.

Bei der Unterscheidung nach dem Schaltungsprinzip ergibt sich die Einteilung in die Rückkoppeloszillatoren und die Negativ-Widerstands-Oszillatoren.

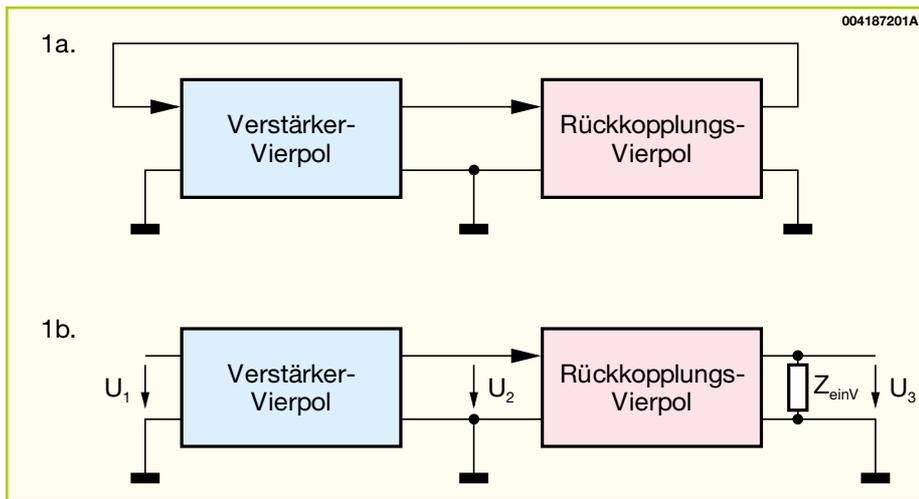


Bild 1: Prinzipielle Darstellung eines Vierpol-Oszillators

Verschiedene Schaltungsprinzipien

Bei den Rückkopplungsoszillatoren (Drei- oder Vierpoloszillatoren) wird über ein frequenzbestimmendes Koppelnetzwerk das Ausgangssignal auf den Eingang des aktiven Elementes, d. h. einer Verstärkerschaltung, zurückgekoppelt. Als aktive Elemente verwendet man je nach Frequenzbereich Operationsverstärker (Vierpol), FETs, Bipolar-Transistoren, GaAs-FETs (Dreipole) usw. Operationsverstärker werden meist als RC-Oszillatoren bis etwa 10 MHz eingesetzt. Mit Bipolartransistoren können mit entsprechenden Resonatoren Oszillatorschaltungen bis zu einigen GHz realisiert werden. Ab 1 GHz bis zur Zeit etwa 90 GHz kommen GaAs-MES-FETs (Gallium Arsenid Metal Semiconductor-FET) bzw. HEMTs (High Electron Mobility Transistor) als aktive Bauelemente zum Einsatz.

Anhand eines solchen Rückkopplungsoszillators lassen sich auch die Schwingbedingungen gut erklären. Wir beschränken uns dabei auf einfache plausible Betrachtungen und verzichten auf die mathematische Herleitung.

Abbildung 1a zeigt vereinfacht einen solchen Vierpol-Oszillator. Zur Schaltungsanalyse ist in Abbildung 1b die Schaltung in Verstärker und Rückkoppelnetzwerk aufgeteilt und die Rückkopplungsschleife aufgetrennt, wobei der zugehörige Ein- bzw. Ausgangswiderstand nachzubilden ist.

Wie man sich leicht überlegen kann, wird die Schaltung sich nur dann selbst anregen, d. h. zu schwingen beginnen, wenn die Ausgangsspannung U_3 gleich der Eingangsspannung U_1 ist. Da diese Spannungen sowohl in der Amplitude als auch in der Phasenlage übereinstimmen müssen, ergeben sich zwei so genannte Schwingbedingungen: Gleiche Amplituden erreicht man bei einer Gesamtverstärkung von $V = 1$ und gleiche Phasenlagen nur bei einer Pha-

sendrehung in Verstärker und Rückkoppelnetzwerk von $\varphi = 0$ bzw. $n \cdot 2\pi$. Da der Verstärker und/oder die Rückkopplung aus frequenzabhängigen Bauteilen besteht, ergibt sich normalerweise nur eine Frequenz, bei der beide Bedingungen erfüllt sind – die Schaltung schwingt genau auf dieser Frequenz.

Auch bei den Negativ-Widerstandsoszillatoren (Zweipoloszillatoren) müssen die Schwingbedingungen erfüllt sein. Diese arbeiten mit aktiven Bauelementen, die in ihrer Strom-Spannungskennlinie einen Teilbereich besitzen, der einen negativen differentiellen Widerstand besitzt. Wird der Arbeitspunkt in diesen Kennlinienbereich gelegt, so ist ein solches Bauelement beispielsweise in der Lage, die Verluste eines LC-Kreises zu kompensieren und somit eine Schwingung anzuregen. Bauelemente mit negativen Kennlinienteilen wie Gunn-Dioden, IMPATT-Dioden oder Tunnel-Dioden sind in der klassischen Elektronik relativ selten zu finden. Ihr Anwendungsgebiet beschränkt sich meist auf die HF-Technik. Der Frequenzbereich dieser Oszillatoren erstreckt sich zur Zeit bis etwa 300 GHz.

Einen Sonderfall stellen die Funktionsgeneratoren dar. Diese, wie beispielsweise der weit verbreitete MAX038, werden oftmals fälschlicherweise der Gruppe der RC-Oszillatoren zugeordnet. Bei dieser Form der Signalerzeugung handelt es sich nicht um einen Oszillator im eigentlichen Sinne, mit mitgekoppeltem Verstärker und frequenzbestimmendem Resonator.

Bei den Funktionsgeneratoren wird mittels eines Integrators ein Dreieckssignal erzeugt. In einem weiteren Schritt formt dann ein Funktionsnetzwerk daraus eine Sinusschwingung.

Verschiedene Resonatoren

Neben den verschiedenen Schaltungstypen lässt sich weiterhin eine Klassifizierung der Oszillatoren anhand ihrer Reso-

nanzelemente vornehmen. Ist die Schwingfrequenz fest vorgegeben, so stabilisiert man diese mit einem Resonator hoher Güte. Bei abstimmbaren Oszillatoren wird die Resonanzfrequenz des Resonators in einem definierten Frequenzbereich, dem Abstimmbereich des Oszillators, verändert. Mit einem abstimmbaren Resonator lässt sich die hohe Güte eines fest abgestimmten Resonators meist nicht erreichen.

Die verschiedenen Resonanzelemente werden je nach Anwendungsfall und Frequenzbereich des Oszillators ausgewählt. Die folgende Auflistung soll einen kurzen Überblick über die verschiedenen Resonanzelemente geben.

LC-Schwingkreis

Zu den einfachsten und bekanntesten Resonatoren gehören die LC-Schwingkreise, die je nach Schaltungskonzept als Reihen- oder Parallelschwingkreis aufgebaut sind. Oszillatorschaltungen mit LC-Kreisen als frequenzbestimmendes Element arbeiten in einem weiten Frequenzbereich von einigen kHz bis in den GHz-Bereich hinein. Für den Aufbau eines abstimmbaren Oszillators eignet sich ein LC-Typ besonders gut. Durch variieren von L und/oder C wird das Resonanzverhalten des Kreises beeinflusst und so die gewünschte Oszillatorfrequenz erzeugt. Da das Abstimmen einer Induktivität auf mechanische Veränderungen beruht (z. B. das Verschieben des Spulenkerns (Variometerabstimmung), findet man derzeit eigentlich nur die Frequenzeinstellung durch das Verändern der Kapazität. Besonders einfach ist hier die Lösung über Kapazitätsdioden (Varaktorabstimmung), womit auf einfache Weise eine Frequenzeinstellung über eine Steuerspannung möglich ist. Solche VCOs (voltage controlled oscillator) findet man vielfach in Empfangsteilen von Radio- und TV-Geräten.

RC-Netzwerk

Im Niederfrequenzbereich ($f < 1$ MHz) werden bei den LC-Oszillatoren die Bauteilwerte „unhandlich“ groß. In diesem Frequenzbereich verwendet man daher oftmals RC-Oszillatoren, deren aktives Element meist ein Operationsverstärker ist. Ein Oszillator, dessen frequenzbestimmendes Element aus einem RC-Netzwerk besteht, ist z. B. der Wien-Robinson-Oszillator. Hierbei besteht das Rückkoppelnetzwerk aus einer speziellen Brückenschaltung, welche für einen Oszillator hoher Güte wichtige Eigenschaft eines steilen Nulldurchganges des Phasenganges besitzt.

Leitungsresonatoren

Im GHz-Bereich werden oftmals Leitungsresonatoren oder Hohlraumresonato-

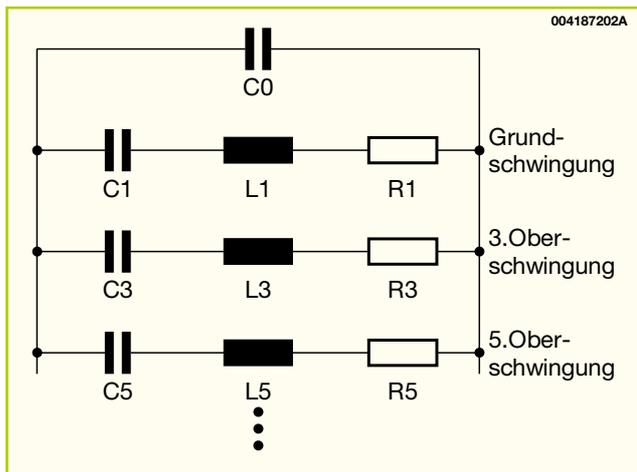


Bild 2: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Quarzes

ren verwendet. Leitungsresonatoren bestehen aus HF-Leitungen geringer Dämpfung, die meist mit einem Kurzschluss oder einem Leerlauf am Leitungsende abgeschlossen sind. Durch das Anschalten einer kleinen Kapazität am Ende einer leerlaufenden Leitung lässt sich die Resonanzfrequenz in gewissen Grenzen beeinflussen. Hierbei wird die elektrische Länge des Leitungsstückes durch den Kondensator verändert. Das Prinzip eines solchen Resonators beruht auf der Leitungstheorie.

Eine Sonderbauform der Leitungsresonatoren stellen Topfkreise und Hohlraumresonatoren dar. Bei Hohlraumresonatoren ist die Leitung ein Hohlleiter und sie werden deshalb auch nur in den Frequenzbereichen eingesetzt, in denen sich Hohlleitermoden in „handlichen“ Hohlleiterstücken ausbilden können, d. h. das Einsatzgebiet liegt im GHz-Bereich.

Dielektrische Resonatoren

Dielektrische Resonatoren werden im Frequenzbereich 1 bis 30 GHz eingesetzt und zeichnen sich durch eine hohe Temperaturstabilität aus. Diese sind in der Satellitentechnik sehr weit verbreitet. Im LNC der TV-Satelliten-Empfangsanlagen arbeitet ein solcher Oszillator mit dielektrischem Resonator als so genannter „Localoscillator“. Aber auch in Basisstationen der Mobilfunknetze findet man mittels dielektrischen Resonatoren stabilisierte Oszillatoren.

Die Wirkungsweise beruht auf der Reflexion elektromagnetischer Wellen an der Grenzfläche zwischen einem Dielektrikum mit hoher Dielektrizitätszahl ϵ_r und Luft, d. h. auf der Ausbildung einer stehenden Welle im Resonanzkörper. Die Resonanzfrequenz dielektrischer Resonatoren ist von den Materialkonstanten und vom mechanischen Aufbau abhängig, daher ist die Abstimmung eines solchen Oszillators praktisch nicht möglich.

Als Material werden z. B. Barium-Titan-Verbindungen mit einem $\epsilon_r \approx 38$ verwendet. Die Vorteile gegenüber den sonst

in diesem Frequenzbereich verwendeten Hohlraumresonatoren ist die höhere Güte und vor allem die wesentlich kleinere Bauform. Ein dielektrischer Resonator für $f = 10$ GHz mit einem $\epsilon_r \approx 38$ besitzt beispielsweise einen Durchmesser von 5 mm bei einer Höhe von 2 mm.

YIG-Resonator

Bei einem YIG-Resonator (Yttrium-Eisen-Granat) handelt es sich um einen ferromagnetischen Resonator, der im Bereich 300 MHz bis 100 GHz eingesetzt wird. Der YIG-Resonator wird mit Hilfe eines Magnetfeldes auf die gewünschte Resonanzfrequenz abgestimmt. Die Ursachen für das Resonanzverhalten hängen unmittelbar mit der Beeinflussung des Eigendrehimpulses der Elektronen, d. h. mit dem so genannten Elektronenspin, zusammen. Eine genauere Erklärung liefert die Physik mit der Quantenmechanik.

Für technische Anwendungen ist ein YIG-Resonator sehr interessant. Da keine harmonischen Resonanzen auftreten, kann ein Oszillator aufgebaut werden, der sich über mehr als eine Dekade sicher und mit hoher Güte abstimmen lässt. Leider sind solche YIG-Oszillatoren immer noch sehr teuer.

Quarz

Quarzoszillatoren sind die wichtigsten nicht abstimmbaren Oszillatoren im Frequenzbereich 10 kHz bis ca. 200 MHz, wobei auf Quarz-Oberschwingungen abgestimmte Oszillatoren bis ca. 600 MHz arbeiten. Sie zeichnen sich durch ihre hohe Güte und damit verbunden durch ihre hohe Frequenzkonstanz und gute Signalqualität aus.

Das selektive Verhalten eines Quarzes beruht auf dem so genannten inversen piezoelektrischen Effekt. Die Gebrüder Curie entdeckten bei Versuchen an Kristallen, dass mechanische Beanspruchungen Ladungsverschiebungen hervorrufen. Dieses Phänomen nennt man den Piezoeffekt. Kehrt man diesen Vorgang um, d. h. man legt ein elektrisches Feld an den Kristall

an, so werden im Quarz mechanische Verformungen hervorgerufen. Durch Anlegen einer Wechsellspannung wird der Quarz somit in mechanische Schwingungen versetzt. Die Kristallstruktur des Quarzes ruft eine mechanische Eigenresonanz hervor, die einen stark frequenzabhängigen Impedanzverlauf des Quarzes zur Folge hat. Das elektrische Ersatzschaltbild eines Quarzes kann, wie in Abbildung 2 dargestellt, durch einen LC-Kreis hoher Güte approximiert werden.

Wie aus dem Ersatzschaltbild, das in der Nähe der zugehörigen Resonanzfrequenz gültig ist, zu ersehen ist, besitzt ein Quarz eine Serienresonanz und eine Parallelresonanz. Quarzoszillatoren werden jedoch immer in Serienresonanz betrieben, da nur diese exakt definiert ist. Die Resonanzfrequenz der Serienresonanz kann durch einen Kondensator in Serie mit dem Quarz über einen kleinen Bereich verändert werden, man spricht dann vom Ziehen des Quarzes. Die Elemente des Serienresonanzkreises L_1 und C_1 sind Parameter des Quarzes und resultieren aus der schwingenden Masse und der Elastizität des Kristalles. Die Parallelkapazität C_0 ist parasitär und wird aus den Streu- und Gehäusekapazitäten gebildet, daher ist die Parallelresonanz nicht exakt definiert.

NF-Quarze mit Resonanzfrequenzen unterhalb 500 kHz werden kaum noch eingesetzt, da sich die Mikrofonie, d. h. die Beeinflussung durch mechanische Erschütterungen des Quarzes, negativ auf die Signalqualität auswirkt. Quarzoszillatoren von 500 kHz bis 60 MHz sind meist als Grundwellen-Oszillatoren aufgebaut. Dabei lässt sich der Quarz schaltungstechnisch im Prinzip wie ein LC-Kreis behandeln.

Oberhalb von 60 MHz kommen meist Oberwellen-Oszillatoren zum Einsatz, da die bis ca. 200 MHz verfügbaren Grundwellenquarze sehr teuer sind. Bei einem Oberwellen-Oszillator findet die Anregung des Quarzes nicht auf der Grundschwingung statt, sondern auf einem seiner ungradzahligen Vielfachen. Dies geschieht mit Hilfe eines LC-Kreises, der dafür sorgt, dass der Verstärker in der Oszillatorschaltung an der gewünschten Oberschwingungsfrequenz ein Verstärkungsmaximum hat, d. h. die Schwingbedingungen nur an dieser Frequenz erfüllt sind. Im Ersatzschaltbild ist die Möglichkeit einer Oberwellenanregung durch mehrere parallele Serienresonanzkreise dargestellt.

Die Eigenschaften eines Quarzes lassen sich durch die Schnittführung bei der Herstellung beeinflussen. Dabei wird durch Variation des Schnittwinkels zu den Achsen der Kristallstruktur beispielsweise das Temperaturverhalten optimiert. Am weitesten verbreitet ist der so genannte AT-Schnitt, der das in Abbildung 3 dargestellte

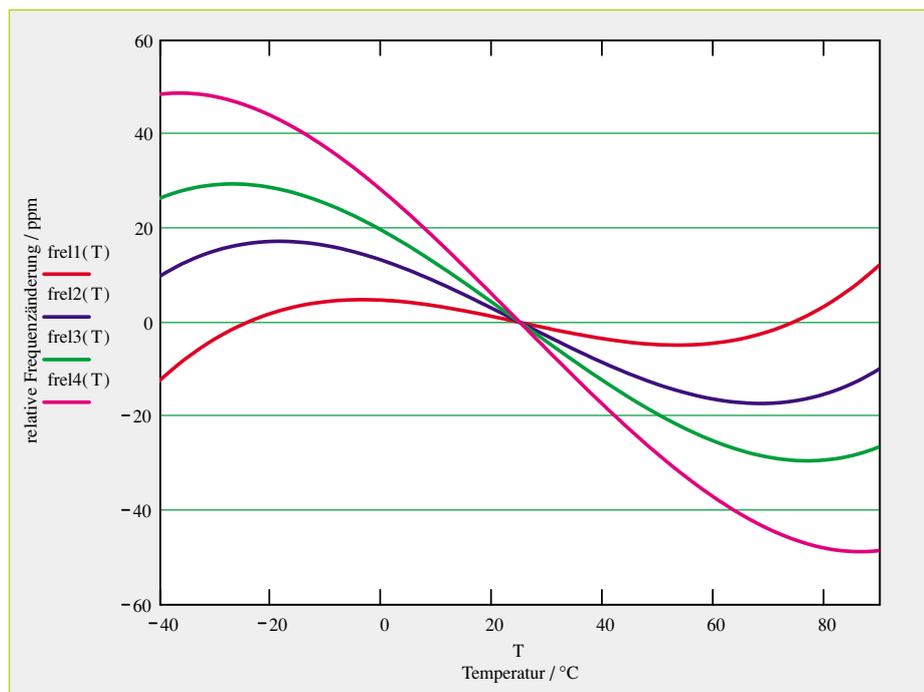


Bild 3: Temperaturverhalten eines Quarzes mit AT-Schnitt - Schnittwinkel als Parameter

Temperaturverhalten erzeugt. Wie der Schnittwinkel dieses Verhalten beeinflusst, zeigen die diversen Graphen, die alle einer kleinen Veränderung des Winkels im Zehntelmillimeterbereich entsprechen. Aufgezeigt ist dort die relative Frequenzänderung $\Delta f/f$ in ppm (parts per million), d. h. mit der „Einheit“ 10^{-6} , über der Temperatur T . So bedeutet beispielsweise eine relative Frequenzänderung von +50 ppm bei einem 10-MHz-Quarz eine absolute Abweichung von:

$$\Delta f = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \text{ MHz} = 500 \text{ Hz}$$

Die Resonanzfrequenz dieses Quarzes hätte sich damit auf 10,0005 MHz verschoben. Mathematisch lässt sich das Temperaturverhalten eines AT-Schnittes mit folgender Gleichung 3. Grades beschreiben:

$$\frac{\Delta f}{f} = a_1 \cdot (T - T_{inv}) + a_3 \cdot (T - T_{inv})^3$$

Wobei T_{inv} die Temperatur des Wendepunktes im Graphen ist und die Variablen a_1 und a_3 Quarzparameter sind. Wie die Abbildung zeigt, lassen sich zwei Umkehrpunkte erzeugen. Das Besondere an diesen Punkten ist, dass die Temperaturabhängigkeit hier gerade Null ist. Dies bedeutet, dass dort kleine Änderungen der Temperatur keine Frequenzänderungen zur Folge haben. Diese Tatsache wird bei temperaturstabilisierten Quarzoszillatoren ausgenutzt.

Quarzoszillatoren

Oszillatoren, die die Frequenz mittels Quarzresonatoren stabil halten, sind in der

Technik sehr weit verbreitet. Ihre einfache Anwendbarkeit bei guter Frequenzstabilität gewährleisten diesen universellen Einsatz. In GPS-Anwendungen sind sie genauso zu finden wie in einfachen Mikrocontroller-Systemen und im Mobilfunkbereich. Optimiert auf ihren Anwendungsfall, kommen dann einfache Quarzoszillatoren oder speziell stabilisierte und kompensierte Varianten zum Einsatz.

Ein wesentliches Leistungsmerkmal eines jeden Oszillators ist die Frequenzstabilität. Bei einem einfachen Quarzoszillator (XO = crystal oscillator) wird diese Genauigkeit im Wesentlichen vom Temperaturverhalten des Quarzes bestimmt. Relative Abweichungen von mehr als 100 ppm sind dabei möglich. In den meisten Anwendungen, zum Beispiel bei der Taktung eines Mikrocontroller-Systemes, ist die so erzielte Ganggenauigkeit ausreichend. Bei höheren Ansprüchen an die Stabilität steht bei einem einfachen XO nur die Wahl des Quarzes mit den unterschiedlichen Quarzschnitten als Parameter zur Verfügung.

Spannungsgesteuerte Quarzoszillatoren (VCXO)

Lässt sich die Oszillatorfrequenz mittels einer Gleichspannung in gewissen Grenzen einstellen, so spricht man von einem VCXO (voltage controlled crystal oscillator). Bei dieser Schaltungsvariante der Quarzoszillatoren steht die Optimierung der Ziehfähigkeit im Vordergrund. Bis zu 1000 ppm kontrollierter Frequenzabweichung sind dabei möglich. Das Temperaturverhalten wird dabei nicht positiv

beeinflusst, sodass auch hier große Frequenzabweichungen bei Temperaturänderungen auftreten.

Temperaturkompensierte Quarzoszillatoren (TCXO)

Zum Ausgleich eines in Abbildung 3 dargestellten Quarztemperaturganges kommen beim TCXO (temperature compensated crystal oscillator) analoge oder digitale Kompensationsverfahren zum Einsatz. Bei einem solchen Oszillator wird die Ziehfähigkeit mittels Kapazitätsdioden ausgenutzt. Aus der gemessenen Temperatur des Quarzes wird eine „Ziehspannung“ generiert, die die theoretisch gemäß den Quarzparametern auftretende Frequenzabweichung zurückkorrigiert. Gute TCXOs erreichen Abweichungen von ± 3 ppm im Temperaturbereich von -20 °C bis 70 °C.

Bei diesem Verfahren muss daher das Temperaturverhalten des Quarzes genau bekannt sein, damit eine exakte Stabilisierung möglich ist. Meistens kommt in solchen Systemen eine reine analoge Kompensation zum Einsatz. Hier sind die temperaturabhängigen Kompensationselemente direkt im Quarzkreis eingesetzt oder ein zusätzliches Widerstandsnetzwerk zur Temperaturbestimmung (NTC, PTC) erzeugt indirekt eine temperaturkompensierende Abstimmspannung.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz eines eigenen Mikrocontrollers, der die Temperatur ermittelt und dann mittels einer in der Speicher abgelegten Tabelle oder über eine numerische Berechnung die Abstimmspannung zum Ziehen über einen D/A-Wandler ausgibt.

Temperaturstabilisierter Quarzoszillator (OCXO)

Noch bessere Temperatureigenschaften lassen sich mit einem OCXO (oven controlled crystal oscillator) erreichen. Hier werden der Quarz und andere frequenzbestimmende Bauteile (Lastkapazitäten etc.) mit Hilfe einer Regelung auf einer konstanten Temperatur gehalten. Idealerweise legt man diese Betriebstemperatur des Quarzofens genau in den Umkehrpunkt des Quarz-Temperaturganges, da der Temperaturkoeffizient dort minimal ist. Mit diesem Schaltungskonzept lässt sich je nach Aufwand eine Temperaturstabilität von bis zu $1/1000$ ppm (!) erreichen. Die Nachteile dieser Oszillatorvariante sind die sehr hohe Stromaufnahme, bedingt durch die erforderliche Heizung und die relativ lange Einlaufzeit.

Nach diesen intensiven theoretischen Vorbetrachtungen stellen wir im nächsten Teil dieses Artikels die Schaltung eines solchen temperaturstabilisierten Quarzoszillators vor.