

Temperaturstabilisierter Quarzoszillator OCXO 400

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.

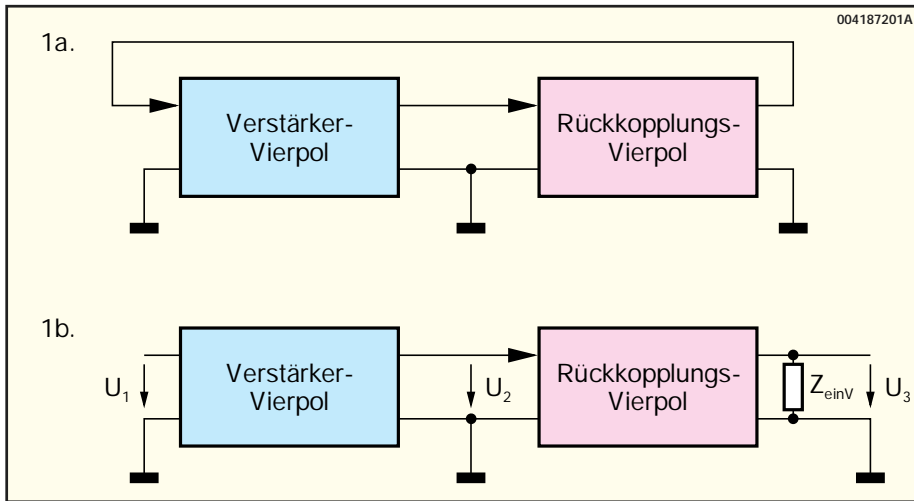


Bild 1: Prinzipielle Darstellung eines Vierpol-Oszillators

Verschiedene Schaltungsprinzipien

Bei den Rückkopplungsozillatoren (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 Elektron Mobility Transistor) als aktive Bauelemente zum Einsatz.

Anhand eines solchen Rückkopplungsozillators 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-Widerstandsozillatoren (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 Schaltungsstypen 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-

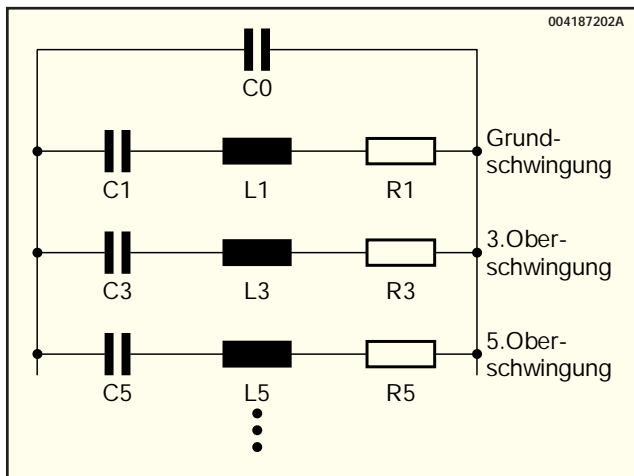


Bild 2: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Quarzes

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 Obertonanregung 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

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 Leitungstückes 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 sogenannten 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

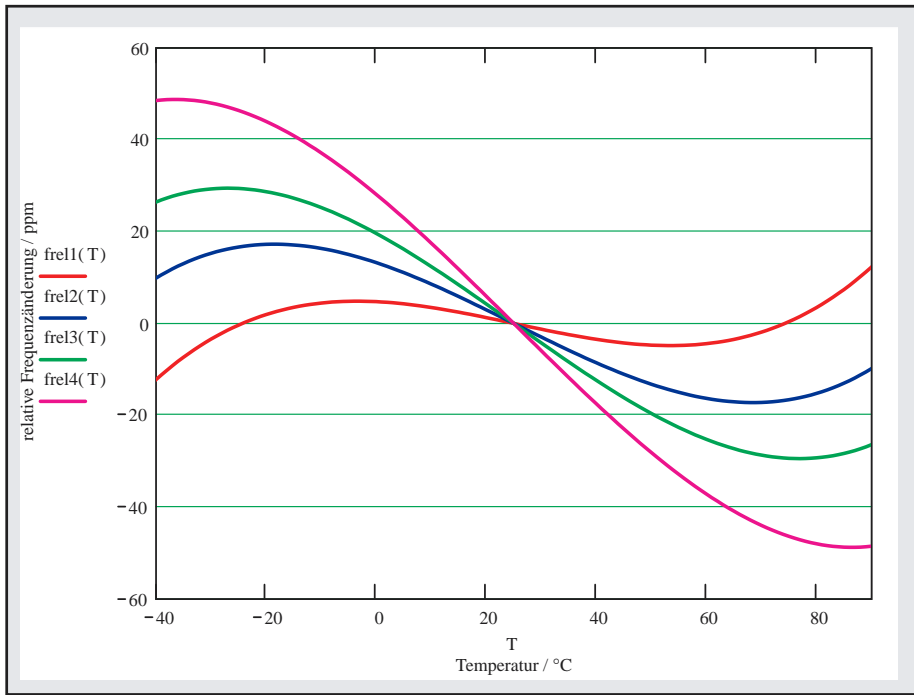


Bild 3: Temperaturverhalten eines Quarzes mit AT-Schnitt - Schnittwinkel als Parameter

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 im 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.

ELV-OCXO 400

In vielen Anwendungen, vor allem in der Messtechnik, ist die Güte eines Gerätes

Technische Daten: OCXO 400

Frequenzbereich: . 2 MHz bis 25 MHz
Frequenzstabilität (typ.): $2 \cdot 10^{-8} / ^\circ\text{C}$
Vorgesehener Quarz:

- Typ: AT-Schnitt
- Gehäuse: HC-49/U,
6,6 mm bis 13,5 mm Bauhöhe

Betriebsspannung: 7 V bis 13 V
Abstimmspannung: 1 V bis 28 V
Stromaufnahme

- Anheizphase: 140 mA

- Betrieb (typ. @ 10 V): 50 mA

Abmessungen

(H x B x T): 30 x 37 x 37 mm

direkt verbunden mit der Genauigkeit eines zur Verfügung stehenden Referenzsignals. Dabei kommt in der elektrischen Messtechnik die Zeitmessung aufgrund ihrer einfachen Handhabung in Verbindung mit einer hohen Genauigkeit sehr oft zum Einsatz. Voraussetzung ist dafür aber eine genaue und konstante Referenzquelle. Im Allgemeinen reicht die Frequenzkonstanz eines herkömmlichen Quarzoszillators dabei nicht aus. Hier wirkt sich die unzureichende Stabilität unter dem Einfluss verschiedener Parameter wie Temperaturschwankungen, Betriebsspannungsschwankungen etc. wesentlich auf die Genauigkeit aus. In den meisten Anwendungen sind daher auch diese Kennwerte eines Oszillators, die zusammenfassend als Kurz- und Langzeitstabilität bezeichnet werden können, wichtiger als die absolute Genauigkeit der Frequenz.

Bei Quarzoszillatoren ist der Einfluss der Umgebungstemperatur sehr ausgeprägt. Bei den üblichen Temperaturkoeffizienten eines Quarzes ergeben sich Abweichungen von 50 ppm - bei einem 10-MHz-Quarz entspricht dies einer Frequenzänderung von 0,5 kHz. Aus diesem Grunde zielen nahezu alle Versuche, die Stabilität eines solchen einfachen XOs (crystal oscillator) zu verbessern, auf die Kompensation des Temperaturverhaltens ab. Bei den heutigen Verfahren erreicht man mit dem Aufbau eines temperaturstabilisierten Quarzoszillators (OCXO = oven controlled crystal oscillator) die besten Ergebnisse bezüglich der Temperaturstabilität. Dabei sind natürlich auch diesem Verfahren Grenzen gesetzt.

Mit sehr hohem Aufwand erreicht man mit einem OCXO Temperaturstabilitäten von 10^{-9} . Ist eine noch höhere Stabilität gefordert, muss man auf weitere stabilisierende Maßnahmen zurückgreifen. Beispielsweise lässt sich die Frequenz eines Quarzoszillators mittels eines im Regelkreis befindlichen Rubidiumstandards auf Genauigkeiten von 10^{-11} steigern. Solche Präzision ist allerdings nur bei sehr wenigen Anwendungen gefordert. Als technisch not-

wendig und wirtschaftlich sinnvoll reicht meist eine Stabilität im Bereich von $10^{-8} / ^\circ\text{C}$. So erreicht auch der ELV OCXO 400 eine Temperaturstabilität von $2 \cdot 10^{-8} / ^\circ\text{C}$ (typ.), wobei aber natürlich auch die Güte des eingesetzten Quarzes entscheidend mitgeht. Die daraus resultierende Abweichung der absoluten Frequenz richtet sich folglich nach dem bestückten Quarz.

Da die benötigte Ausgangsfrequenz eines Referenzoszillators anwendungsspezifisch ist, wird der ELV-OCXO ohne Quarz geliefert. Die im Folgenden vorgestellte Schaltung des temperaturstabilisierten Quarzoszillators besitzt einen Arbeitsbereich von 2 MHz bis 25 MHz und deckt somit nahezu den gesamten interessierenden Frequenzbereich ab.

Schaltung

Die in Abbildung 4 dargestellte Schaltung des ELV-OCXOs kann prinzipiell in drei Bereiche unterteilt werden: die eigentliche Signalerzeugung, die Temperaturstabilisierung und die Spannungsversorgung.

Zur Erzeugung der Sinusschwingung dient ein zweistufiger Colpitts-Oszillator. Dieser ist mit den beiden Transistoren T 1 und T 2 und Beschaltung aufgebaut, wobei die Widerstände R 5 und R 6 den Arbeitspunkt bestimmen. In diesem, auch als kapazitive Dreipunktschaltung bekannten Oszillatortyp, arbeitet der Quarz Q 1 als einziges frequenzbestimmendes Element. Den kapazitiven Dreipunkt bilden die Kondensatoren C 14 und C 15, die für die notwendige Mitkopplung sorgen. Damit sich eine Schwingung ausbilden kann, wird das Signal vom Emitter von T 2 phasenrichtig auf den Eingang, die Basis von T 1, gekoppelt.

Der Quarz, der über Kondensator C 13 angebunden ist, sorgt für die gewünschte Selektivität der Schaltung. Aufgrund seines hohen Kapazitätswertes hat C 13 im Gegensatz zu C 12 keinen Einfluss auf die Schwingfrequenz. Mit dem als C-Trimmer ausgeführten Kondensator C 12 lässt sich die Resonanzfrequenz des Quarzes in gewissen Grenzen beeinflussen. Rein schaltungstechnisch wird mit diesem in Reihe zum Quarz geschalteten „Ziehkondensator“ (Cs) die Kapazität C1 aus dem Quarzersatzschaltbild (Abbildung 2, „ELVJournal“ 4/00) verkleinert. Damit ergibt sich eine neue, höhere Resonanzfrequenz. Die „gezogene“ Schwingfrequenz fz lässt sich über folgende Formel bestimmen:

$$f_z = f_{\text{Quarz}} \cdot \left(1 + \frac{C1}{C_s} \right)$$

Neben der mechanischen Einstellung mittels C-Trimmer besteht weiterhin die

Möglichkeit, die Ausgangsfrequenz auf elektronischem Wege zu beeinflussen. Dies geschieht mit Hilfe der Kapazitätsdiode D 1, die über die Koppelkapazität C 11 an den Quarz angebunden ist. Die über den externen Anschluss ST 3 zugeführte Abstimmspannung wird über den Widerstand R 4 als Sperrspannung auf die Diode geführt. Diese verändert dann in Abhängigkeit vom Spannungswert, der zwischen 1 V und 28 V liegen muss, ihre Kapazität und erlaubt somit das elektrische „Ziehen“ der Oszillatorfrequenz. Da die Frequenzstabilität eines Quarzes durch eine sich ändernde Gleichspannung negativ beeinflusst wird, sorgt der Kondensator C 11 für die notwendige Entkopplung. Der Widerstand R 4 verhindert in Verbindung mit der Kapazität C 7, dass die Oszillatorfrequenz über den Anschluss der elektronischen Frequenzeinstellung abgestrahlt wird. Eventuell vorhandene hochfrequente Störsignale, die der Abstimmspannung überlagert sein könnten, werden auch durch den Kondensator C 7 abgeblockt.

Im Signalweg folgt dem mit den Transistoren T 1 und T 2 aufgebauten Colpitts-Oszillator der Pufferverstärker. Dieser mit T 3 aufgebaute HF-Verstärker sorgt für die notwendige Pegelanhebung des Oszillatorsignales. Weiterhin reduziert ein solcher nachgeschalteter Verstärker die Rückwirkungen vom Ausgang, d. h. von der angeschalteten Last, auf den eigentlichen Oszillator, sodass die Oszillatorfrequenz kaum von einer Laständerung beeinflusst wird. Das Oszillatorsignal wird am Kollektor von T 2 abgegriffen und über den Koppelkondensator C 16 auf den nachfolgenden Transistorverstärker gegeben. Über C 17 gelangt das Signal dann kapazitiv entkoppelt auf den HF-Ausgang ST 8.

Um die gesteigerten Genauigkeitsanforderungen erreichen zu können, ist eine möglichst exakte Temperaturstabilisierung vonnöten. Dazu verfügt der ELV-OCXO 400 über eine Heizung, die in Verbindung mit der zugehörigen Regelschaltung und dem thermisch isolierten Gehäuse eine stabile Innentemperatur erzeugt. Als Heizelemente dienen die Transistoren T 4 und T 5, die sich im Platinenlayout in unmittelbarer Nähe zum Quarz befinden. Über den Temperatursensor R 18 wird die aktuelle Innentemperatur erfasst, die Widerstände R 15 und R 16 geben den Sollwert vor. Bei einer Differenz zwischen Soll- und Isttemperatur ist die Brückenschaltung aus R 15 bis R 18 nicht ausgeglichen, die Spannung in der Brückendiagonalen ist ungleich Null. In diesem Fall gibt die Reglerschaltung aus IC 2 und Beschaltung am Ausgang eine Steuerspannung aus, die die Heiztransistoren entsprechend steuert.

In der Anheizphase ist der Widerstand des Temperatursensors relativ klein. So

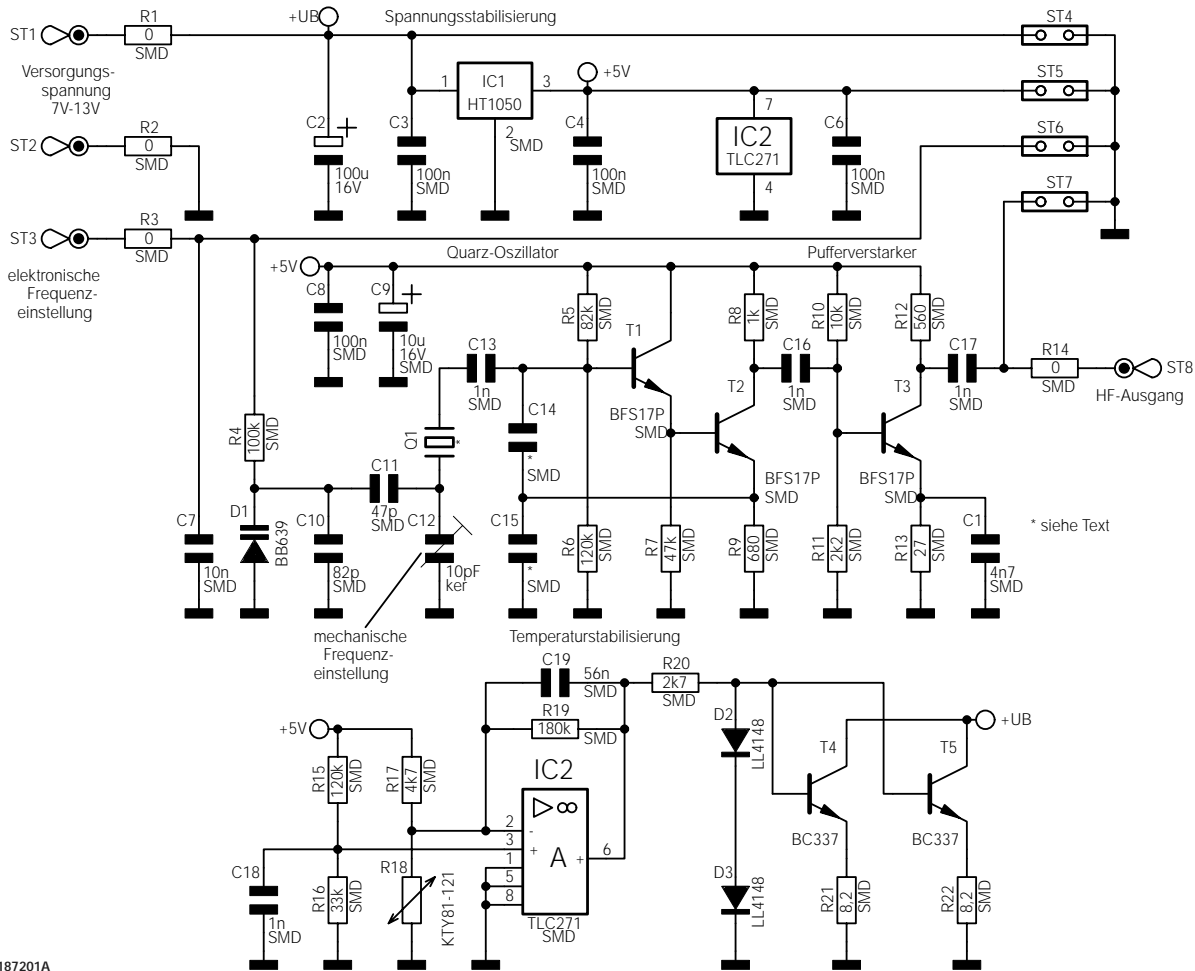


Bild 4:
Schaltbild
des OCXO

005187201A

mit ist die Spannung am nicht-invertierenden Eingang des Operationsverstärkers größer als die am invertierenden. Dementsprechend werden die Heizelemente, d. h. die beiden Transistoren, so angesteuert, dass der maximale Kollektorstrom fließt. Die Emitterwiderstände R 21 und R 22 bilden dabei eine Gegenkopplung. Sie begrenzen den maximalen Heizstrom pro Transistor auf ca. 65 mA. Die anfallende Verlustleistung, die ja der Heizleistung entspricht, richtet sich damit nur nach der anliegenden Betriebsspannung, die mit der unstabilierten Versorgungsspannung identisch ist. Somit ist auch die Dauer der Anheizphase von der Versorgungsspannung abhängig.

Damit der schwankende Heizstrom und die ggf. daraus resultierende sich ändernde Versorgungsspannung keinen Einfluss auf die Oszillatorfrequenz hat, wird die Betriebsspannung für die Oszillatorschaltung aus einer separaten Spannungsstabilisierung gewonnen. Der Spannungsregler IC 1 generiert aus der am Anschluss ST 1 anliegenden Versorgungsspannung die stabilisierte 5-V-Betriebsspannung. Diese versorgt neben dem Oszillator und der Pufferstufe auch die Reglerschaltung, damit auch hierüber Spannungsschwankungen keinen negativen Einfluss auf die Frequenzstabilität haben.

Eine Besonderheit in der Schaltung stellen die 0-Ohm-Widerstände R 1 bis R 3 und R 14 dar. Diese dienen nur der thermischen Entkopplung und vermindern die Wärmeabfuhr über die nach außen geführten Anschlussdrähte. Damit ist die Schaltung des temperaturstabilisierten Quarzoszillators detailliert erläutert und es folgt die ausführliche Beschreibung des Nachbaus.

Nachbau

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Temperaturstabilität im Innern des Oszillators, kommt dem Aufbau eine besondere Aufgabe zu. Ein wesentlicher Parameter ist dabei die thermische Isolierung, damit die Heizleistung so klein wie möglich gehalten werden kann. Weiterhin hat eine schlechte Isolation auch ein erhöhtes internes Temperaturgefälle zur Folge. Dieser Temperaturgradient kann dann dafür sorgen, dass wesentliche Teile, beispielsweise der Quarz, nie die gewünschte Solltemperatur erreichen. Aus diesem Grunde wird der Quarzoszillator in ein thermisch gut isoliertes Gehäuse eingebaut.

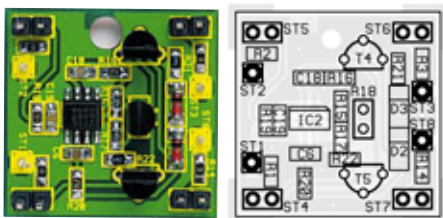
Um eine gute Wärmeverteilung und somit eine gute Arbeitsweise der Temperaturregelung sicherstellen zu können, ist die Schaltung des ELV-OCXO auf zwei Platinen aufgeteilt, die in Sandwich-Bauweise

übereinander angeordnet werden. Die obere Platine trägt die eigentliche Oszillatorschaltung und die Spannungsstabilisierung, auf der unteren befindet sich die Temperaturregelung. Bei den beiden Platinen mit dem Abmessungen 27 mm x 27 mm handelt es sich um doppelseitige Leiterplatten mit einem separaten Masselayer.

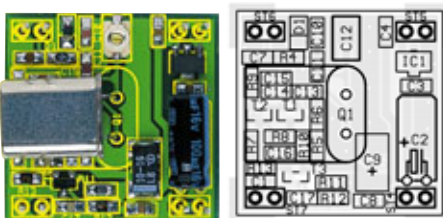
Eine wesentliche Voraussetzung für die Kompaktheit der Schaltung ist die Verwendung von SMD-Bauteilen. Bei den nun folgenden Bestückungsarbeiten, die anhand der Stückliste und des Bestückungsdruckes ausgeführt werden, ist aufgrund der Bauteilgröße und der zum Teil beengten Platzverhältnisse besonders sorgfältig vorzugehen.

Im ersten Arbeitsschritt wird die Reglerplatine aufgebaut, beginnend mit dem Auflöten der SMD-Widerstände. Bei der Bestückung der Kondensatoren ist erhöhte Aufmerksamkeit gefordert, da SMD-Kondensatoren keinen Werteindruck besitzen. Sie können also nach Entnahme aus der Verpackung nur durch explizites Ausmessen identifiziert werden. Eine Besonderheit gilt bei den Kondensatoren C 14 und C 15. Diese müssen gemäß Tabelle 1 an die Schwingfrequenz angepasst werden.

Die Dioden und der Operationsverstärker IC 2 sind anschließend unter Beachtung der Einbaulage aufzulöten. Bei den



Fertig aufgebaute Reglerplatine mit zugehörigem Bestückungsplan



Fertig aufgebaute Oszillatorplatine mit zugehörigem Bestückungsplan

Dioden muss dazu der Katodenring auf dem Bauteil mit der entsprechenden Markierung im Bestückungsdruck übereinstimmen. Bei der Montage des ICs gibt die Gehäuseeinkerbung eine Orientierungshilfe. Diese muss mit der Kennzeichnung im Bestückungsdruck übereinstimmen. Hier ist beim Anlöten der Anschlusspins besonders darauf zu achten, dass keine Kurzschlüsse durch Lötzinnbrücken entstehen.

Damit sind die SMD-Teile bestückt, und es folgt der Einbau der drei konventionellen Bauteile R 18, T 4 und T 5. Der Temperatursensor R 18 ist so zu positionieren, dass das Bauteilgehäuse auf der Platine aufliegt, wobei die Polarität nicht von Bedeutung ist. Bei den anschließend zu bestückenden Heiztransistoren ergibt sich die richtige Polung aus der Anordnung der Anschlussbeine. Um die erzeugte Wärme gut abgeben zu können, ist es notwendig, einen Abstand von 2 mm zwischen Transistorgehäuse und Platinenoberfläche einzuhalten. Die Reglerplatine ist somit komplett bestückt und es folgt der Aufbau der Oszillatorplatine.

Auch hier sind im ersten Arbeitsschritt die Widerstände und Kondensatoren einschließlich des C-Trimmers einzulöten, wobei die beiden Elektrolyt-Kondensatoren zunächst nicht eingebaut werden. Die Diode D 1 ist unter Beachtung der Polung aufzulöten, wobei der Katodenstrich auf dem Bauteil mit der Markierung im Bestückungsdruck übereinstimmen muss. Beim Einlöten der Transistoren und des

Spannungsreglers IC 1 gibt die Padanordnung die korrekte Lage vor, so dass hier ein Verpolen nicht möglich ist.

Im Anschluss erfolgt der Einbau der Elektrolyt-Kondensatoren unter Beachtung der richtigen Polarität. Hier ist zu bedenken, dass beim bedrahteten Kondensator C 2 der Minuspol am Bauteil gekennzeichnet ist und beim SMD-Elko C 9 der Pluspol!

Als dann ist der entsprechende Quarz einzubauen. Da dieser liegend oberhalb der zugehörigen Oszillatorschaltung positioniert wird, sollte die Platine vor dem Einbau auf Lötzinnbrücken und korrekte Bestückung überprüft werden. Die Schaltung und das Platinenlayout sind für Standardquarze mit AT-Schnitt im HC-49/U Gehäuse ausgelegt. Die Anschlussbeine des Quarzes sind unmittelbar am Quarzgehäuse um 90° abzuwickeln. Beim Einbau ist dann darauf zu achten, dass das Quarzgehäuse auf den darunter befindlichen Bauteilen aufliegt. Die anschließend zwischen Quarzgehäuse und SMD-Bauteile zu schiebende Isolierfolie verhindert elektrische Kurzschlüsse.

Im letzten Schritt sind die Stiftleisten paarweise in die Positionen ST 4 bis ST 7 auf der Oszillatorplatine einzulöten und anschließend auf eine verbleibende Länge von ca. 15 mm (gemessen ab Platinenoberseite) zu kürzen.

Zur Verbindung beider Platinen wird die Reglerleiterplatte so auf die Oszillatorplatine aufgesetzt, dass der Temperatursensor R 18 auf dem Quarz aufliegt und sich die beiden Heiztransistoren T 4 und T 5 neben dem Quarz befinden. Dabei werden die Stiftleisten durch die zugehörigen Bohrungen der Reglerplatine geführt und dort verlötet. Die Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Der sich so ergebende Abstand zwischen beiden Platinen sollte 11 mm nicht überschreiten.

Zum Anschluss des ELV-Quarzoszillators ist in den Anschlusspunkten ST 1 bis ST 3 und ST 8 jeweils ein Stiftleistenpin einzulöten. Dieser ist von der Unterseite durch die entsprechenden Bohrungen zu stecken, und auf der Bauteilseite zu verlöten. Hier ist es besonders wichtig die über die Lötung überstehenden Enden so kurz wie möglich abzuschneiden. Um den späteren Gehäuseeinbau problemlos zu ermöglichen, sollten anschließend die Kunststoffabstandshalter von den Stiften entfernt werden. Ist der Aufbau soweit fortgeschritten, erfolgt nun die erste Inbetriebnahme des OCXO 400.

Inbetriebnahme und Gehäuseeinbau

Zum ersten Funktionstest wird die Spannungsversorgung an die Anschlusspins ST 1 und ST 2 angeschlossen. Diese muss im Bereich von 7 V bis 13 V liegen und einen Mindeststrom von 140 mA liefern können. Die Spannung muss zwar nicht stabilisiert sein, sollte aber eine Restwelligkeit von weniger als 1 V_{ss} aufweisen.

Nach dem Anlegen der Betriebsspannung sollte zunächst die stabilisierte Betriebsspannung „+5V“ gemessen werden. Liegen hier die geforderten 5V ± 0,25 V an, so ist anschließend der Heizstrom der Transistoren zu kontrollieren. Hierzu wird der Spannungsabfall an den beiden Emitterwiderständen R 21 und R 22 gemessen, die im Bereich von 550 mV ± 100 mV liegen sollte.

Sind diese beiden Gleichspannungspiegel verifiziert, muss der eigentlich Oszillator geprüft werden. Hierzu wird das HF-Ausgangssignal am Anschluss ST 8 mit einem Oszilloskop aufgenommen. Die Amplitude ist in gewissem Maße von der Oszillatorfrequenz abhängig, sollte aber im Bereich von 2,6 V_{ss} bis 4 V_{ss} liegen. Die korrekte Schwingfrequenz kann mit einem Frequenzzähler geprüft werden. Hierbei ist dann auch der Grobvergleich auf die Sollfrequenz mit Hilfe des C-Trimmers C 12 vorzunehmen. Anschließend erfolgt der Einbau ins Gehäuse.

Dazu wird das Platinen-Sandwich mit der Oszillatorplatine voran in den Gehäusekörper abgesenkt. Auf die unten herausragenden Anschlusspins wird dann der untere Verschlussdeckel gepresst und somit das Gehäuse geschlossen. Damit ist der Nachbau abgeschlossen, und das Gerät kann in das eigentliche Zielsystem, z. B. als Referenzoszillator in einem Frequenzzähler, eingesetzt werden. Dort sollte dann auch der exakte Abgleich der Frequenz mit Hilfe der über ST 3 zuzuführenden Abstimmspannung erfolgen. Diese muss in einem Bereich von 1 V bis 28 V liegen. Zu beachten ist dabei, dass diese Spannung exakt stabilisiert sein muss, da sich jegliche Schwankung sofort auf die Frequenzstabilität des OCXOs auswirkt. Dieser Feinabgleich sollte auch erst nach etwa 1 Stunde Betriebszeit erfolgen und ggf. nach einer Woche wiederholt werden, da der Quarz an sich einer Alterung unterliegt, die in den ersten Betriebsstunden am größten ist.

Weiterhin ist beim Einlöten des Quarzoszillators darauf zu achten, dass die Anschlusspins vorsichtig anzulöten sind, da zu langes Löten der Wärmeisolierung des Gehäuses schadet. Nach dem erfolgreichen Aufbau steht dem Einsatz des neuen temperaturstabilisierten Quarzoszillators nichts mehr im Wege.

ELV

Tabelle 1:
Kapazitätswerte für C 14 und C 15

Frequenzbereich	2 MHz bis 6 MHz	6 MHz bis 15 MHz	15 MHz bis 25 MHz
C 14	680 p	220 p	47 p
C 15	1,8 n	680 p	220 p

**Stückliste:
Temperaturstabilisierter
Quarz-Oszillator**

Widerstände:

0Ω/SMD	R1-R3, R14
8,2Ω/SMD	R21, R22
27Ω/SMD	R13
560Ω/SMD	R12
1kΩ/SMD	R8
680Ω/SMD	R9
2,2kΩ/SMD	R11
2,7kΩ/SMD	R20
4,7kΩ/SMD	R17
10kΩ/SMD	R10
33kΩ/SMD	R16
47kΩ/SMD	R7
82kΩ/SMD	R5
100kΩ/SMD	R4
120kΩ/SMD	R6, R15
180kΩ/SMD	R19
Temperatursensor, KTY81-121 ..	R18

Kondensatoren:

47pF/SMD	C11, C14*
82pF/SMD	C10
220pF/SMD	C14*, C15*
680pF/SMD	C14*, C15*
1nF/SMD	C13, C16-C18
1,8nF/SMD	C15*
10nF/SMD	C7
56nF/SMD	C19
100nF/SMD	C3, C4, C6, C8
10μF/16V/SMD	C9
100μF/16V	C2
C-Trimmer, 10pF/SMD	C12

Halbleiter:

HT1050/SMD	IC1
TLC271/SMD	IC2
BFS17P/SMD	T1-T3
BC337	T4, T5
BB639/SMD	D1
LL4148	D2, D3

Sonstiges:

Quarz, 2 MHz bis 25 MHz (nicht im Lieferumfang)	Q1*
Stiftleisten, 1 x 1-polig, 34 mm	ST1-ST3
Stiftleisten, 2 x 1-polig, 34 mm	ST4-ST7
1 Isolierfolie, 13 x 20 mm	
1 Gehäuse, komplett	

*= siehe Text

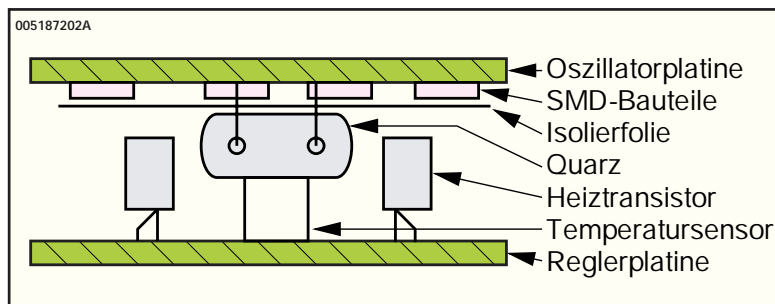


Bild 5:
Prinzipielle
Anordnung
der
Platinen