SIMPLE-GPSDO

GPS-disziplinierter 10 MHz Ofen-Quarz-Oszillator

Manual und Baubeschreibung (bis PCB rev.2.1_xx)

Günter Fred Mandel, DL4ZAO - Michael Knietzsch, DL7UKM

Inhalt

Allgemeines **2**
Anwendungen **2**
Funktionsprinzip **3**
Blockschaltbild **3**
GPS Module u-blox NEO-6/7 - Timepuls Konfiguration - **4**
Beschreibung der Schaltung **4**
Holdover-Modus 5
Schaltbild **7**
Bestückungszeichnung **8**
Aufbau **9**
Wichtige Bestückungshinweise 9
Lötjumper 9
Auswahl der Phasenvergleichsfrequenz f_comp 9
Funktion der Steckverbinder und Jumper 10
Anschluss des NEO - GPS Modul 11
Arduino Nano v3 12
Laden der Software auf den Arduino 12
Test- und Messpunkte 13
Inbetriebnahme **13**
Qualitätsbestimmende Faktoren **14**
Zusatzbaugruppe 4 x Fanout-Buffer **15**
Referenzen und weiterführende Informationen **16**
Stückliste **17**
Tabelle verwendbarer Oszillatortypen **26**
Etwas Hintergrundwissen zum Verständnis der Begriffe **28**
Änderungshistorie **36**

Simple-GPSDO

- Genaues und stabiles 10 MHz Frequenznormal
- Ofenstabilisierter-Quarzoszillator (OCXO) über analoge Regelung an den hochgenauen GPS Zeitpuls angebunden
- Ausgang – Rechteck ca. 2,2Vss an 50 Ω
- Erweiterbar (Zusatzbaugruppe: 4 x Fanout-Buffer) um 4 Ausgänge mit Sinussignal
- Holdover Modus manuell justiert oder softwaregestützt (vorbereitet)
- Als Frequenznormal für Frequenzzähler, Timer, Digimodes und SAT-Betriebsarten
- Versorgung: stabilisierte und gesiebte Gleichspannung, typisch 7 bis 9V
- Stromaufnahme bis zu 1A in der Aufheizphase, typ. 400mA im Dauerbetrieb

Allgemeines

Das Konzept beschreibt einen einfachen GPSDO mit einer analogen Phasenregelschleife. Der GPSDO verbindet die Kurzzeitstabilität eines ofenstabilisierten Quarzoszillators mit der Langzeitstabilität der Zeitsignale von den Atomuhren von GPS-Satelliten.

Der Timepuls-Takt aus einem GPS-Modul ist zwar im zeitlichen Mittel sehr genau, die Einzelimpulse sind aber durch Schwankungen der Ausbreitungswege und wegen des Sawtooth Effekts mit Jitter behaftet. Die über einen ausreichenden Zeitraum gemittelte Genauigkeit ist zwar sehr hoch, die Kurzzeitstabilität aber ungenügend. Ein TCXO oder OCXO hingegen hat eine gute Kurzzeitstabilität, läuft aber durch Alterung oder andere Einflüsse über die Zeit von der Sollfrequenz weg. Beim GPSDO verbindet man das Beste aus den zwei Welten und synchronisiert einen Quarzoszillator mit dem GPS-Timepuls. Ein PLL-Schleifenfilter mit langer Zeitkonstante mittelt den Jitter aus. Die PLL übernimmt quasi die Funktion eines Schwungrades, die den Jitter des GPS Signals eliminiert und den Quarzoszillator auf die exakte Frequenz zieht.

Das Grundkonzept des Simple-GPSDO beruht auf einem Vorschlag von J.R. Miller, G3RUH [2]. Eine Arduino S/W für die Änderung der Timepuls-Frequenz von u-Blox NEO-7 bzw. NEO-6 Modulen von Alain, F1CJN [3] wurde von DL7UKM aufgegriffen und auf die Verwendung im Simple-GPSDO adaptiert und erweitert. Ein Arduino Nano Mikrocontroller übernimmt beim Einschalten die Konfiguration der Timepuls Frequenz des NEO GPS Moduls und danach die Anzeige von Betriebsdaten. Die Anbindung eines OCXO an den GPS Zeitpuls erfolgt über eine analoge Phasenregelschleife und einem Schleifentiefpass mit langer Zeitkonstante. Damit ein Nachbau auch für weniger Geübte einfach ist, werden überwiegend bedrahtete Bauelemente verwendet.

Anwendungen

- Messtechnik: Normalfrequenz zur frequenzgenauen Synchronisierung von Frequenzmessern, Zeitmessern, HF-Analyzer, Signal-Generatoren.
- Frequenznormal zur Synchronisierung von Sendern, Empfängern, SDR
- Frequenznormal zur genauen Frequenzaufbereitung für SAT Transverter und LNB.
- Taktgeber für zeitkritische Digimodes, Zeitmessung in der Radioastronomie
- Testquelle zur Überprüfung und Kalibrierung von Frequenzzählern und Zeitmessern.
- Kammgenerator mit einem breiten Spektrum von Harmonischen der Grundfrequenz

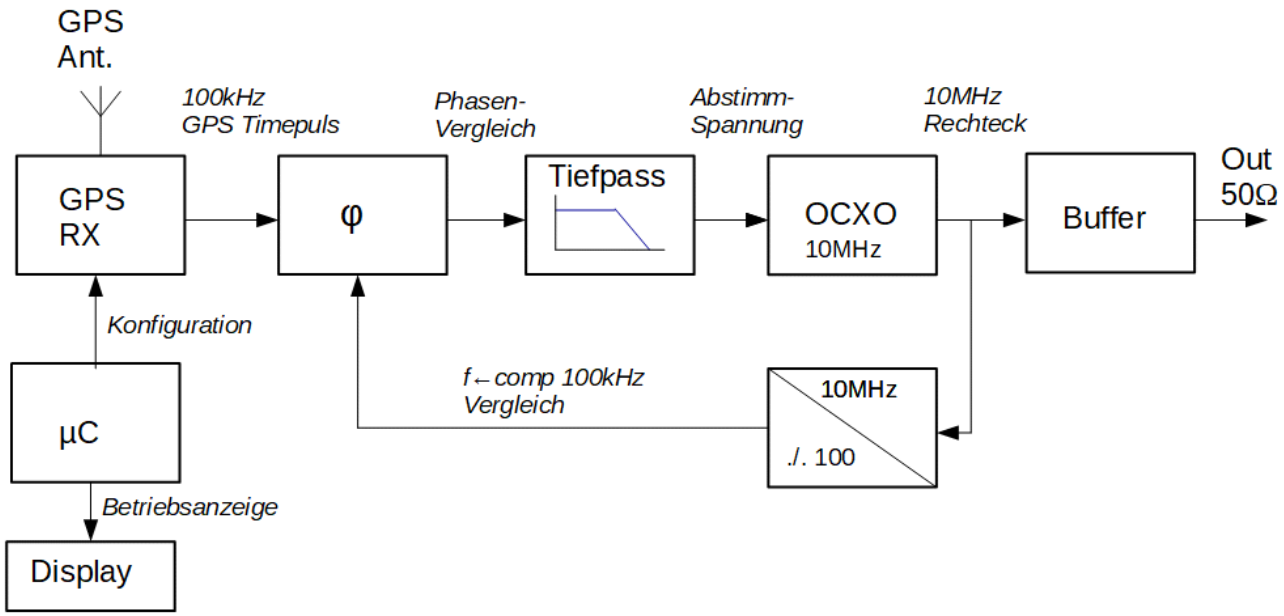
Funktionsprinzip

Über eine GPS-Antenne und ein hochintegriertes NEO Empfangsmoduls der Firma u-blox werden die Zeit-Signale der GPS-Satelliten empfangen und als Zeit-Referenz für die Anbindung eines OCXO, eines Ofen-stabilisierten Quarzoszillators verwendet. Der verwendete OCXO kann mit einer Abstimmspannung im Bereich von wenigen Hertz um seine Nennfrequenz gezogen werden (VC-OCXO, Voltage Controlled-OCXO). Navigations-Satelliten haben Cäsium-Atomuhren als hochgenaue Zeitbasis an Bord. (1×10^{-12}). Diese Referenz wird zum Vergleich und zur Generierung eines Korrektursignals für den OXCO herangezogen. Mit einem guten OCXO als Basis und einem GPS-Empfängermodul mit Timepuls und geringem Jitter wie den U-blox NEO M6/7 lässt sich eine Frequenzgenauigkeit und Stabilität von bis zu $\pm 1*10^{-11}$ in 200s oder ±0,1Hz auf 10GHz erreichen (das entspricht einer Abweichung von etwa ±860ns/Tag oder 1s in 3200 Jahren).

Dazu wird in einem Phasenvergleicher der GPS-Zeitpuls mit dem 10MHz Frequenz des OCXO verglichen und eine Nachführspannung generiert. Dazu muss vorher der OCXO Ausgangstakt in einem Teiler auf die Frequenz des Timepulses heruntergeteilt werden. Beim Phasenvergleich entsteht ein Korrektursignal, dessen Größe von der Frequenzabweichung der beiden Signale abhängt. Um den Jitter des GPS Zeitsignals auszumitteln wir dieses Korrektursignal über einen Tiefpass mit einer langen Zeitkonstante im Bereich von 20 bis 100 Sekunden gemittelt. Der OCXO kann mit diesem geglätteten Korrektursignal in einem engen Frequenzbereich von wenigen Hz langsam auf die Sollfrequenz nachgestimmt werden.

Die Kurzzeitstabilität und das Phasenrauschen des Oszillators wird durch die Qualität des verwendeten Ofen-Quarzoszillators bestimmt. Die Langzeitstabilität (Tage) wird durch die Anbindung an den Zeitpuls eines GPS Empfängermoduls gewährleistet.

Blockschaltbild



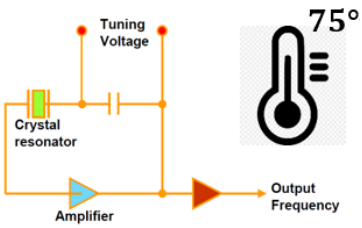
GPS Module u-blox NEO-6/7 - Timepuls Konfiguration -

Als Quelle für die hochgenaue GPS-Vergleichsfrequenz werden günstige Module mit NEO-6M oder NEO-7M GPS Empfängern von u-blox verwendet. Ab Werk ist der Timepuls dieser Module auf 1 Sekunde eingestellt. Beim Empfang von mindestens drei Satelliten beginnt eine SMD-LED im 1 Sekundentakt zu blinken. Dieser Timepuls-Takt ist von der Atomzeit der GPS-Satelliten abgeleitet und im langfristigen Mittel hochgenau. Die Taktfrequenz des Timepulses kann über eine Befehlssequenz über die serielle Schnittstelle des GPS-Moduls auch auf höhere Frequenzen konfiguriert werden. Die u-blox Bausteine der Generation NEO-6 und NEO-7 arbeiten intern mit einem 48MHz Taktgenerator, der mit dem GPS-Satellitensignal synchronisiert ist. Ein programmierbarer Teiler im Modul erlaubt es, nahezu beliebige Timepulsfrequenzen aus diesem Takt abzuleiten. Timepulsfrequenzen, die aus ganzzahligen Teilerverhältnissen aus den 48MHz erzeugt werden, sind Jitter-arm und für den Phasenvergleich in einem GPSDO geeignet. Diese Eigenschaft machen wir uns für den Phasenvergleich mit dem OCXO Signal zu Nutze.

Da die meisten dieser Module keinen separat herausgeführten Ausgang für das Timepuls Rechtecksignal haben, wird der Timepulse mit einem angelöteten Drähtchen zwischen dem u-blox Modul und dem Vorwiderstand der LED abgenommen.

Damit die Frequenz des Timepulses als Vergleichsfrequenz für den Phasenvergleich für unseren GPSDO passt, wird das Modul beim Einschalten per Software Befehl von einem Arduino Mikrocontroller beim Einschalten auf die gewählte Taktfrequenz des Timepulses konfiguriert. Eine Phasenvergleichsfrequenz fcomp von 100kHz hat sich als günstiger Kompromiss zwischen Einschwingverhalten und Stabilität bewährt. Ein Phasenvergleich auf 1kHz ergibt etwas besser Kurzzeitstabilitätswerte. Die Bauteilwerte im Schaltbild beziehen sich auf den Phasenvergleich mit einer 100 kHz Timepuls-Frequenz. Die Leiterplatte ist aber dafür vorbereitet, auch mit Timepulsfrequenzen von 1kHz oder 10 kHz zu arbeiten. Die Umstellung und die Bauteilwerte des PLL- Schleifenfilters für 10kHz und 1kHz sind im Abschnitt „Auswahl der Phasenvergleichsfrequenz f_comp“ in einer Tabelle aufgeführt.

Beschreibung der Schaltung



Ein Kernelement der Schaltung ist der Ofen-stabilisierte 10MHz Quarzoszillator (OCXO). Es ist das qualitätsbestimmende Bauteil in Bezug auf die Kurzzeitstabilität (Jitter, Phasenrauschen) des Ausgangssignals. Ein von Hause aus schlechter Oszillator wird durch die GPS-Anbindung nicht besser, aber die Langzeitstabilität (Stunden, Tage usw.) und die Frequenzabweichung werden korrigiert.

Das zweite Kernelement ist der GPS Empfänger, der einen im Mittel hochstabilen Timepulse als Zeit-Referenz liefert. Hier wird ein Empfangsmodul der Firma u-blox aus der NEO Serie verwendet. Es können die günstig erhältlichen Module NEO-M6M und die neueren NEO-7M verwendet werden. NEO-M8 Module erfordern eine Modifikation der Software, da der Befehl zur Initialisierung der Timepulsfrequenz abweicht. Zum Anschluss einer geeigneten GPS Antenne verfügt das NEO Modul über eine Mikro-Koaxbuchse vom Typ U.Fl/IPEX. Von dort kann über ein IPEX-SMA Patchkabel IPEX auf SMA eine handelsübliche externe GPS Antenne angeschlossen werden. Alternativ kann auch das komplette GPS Modul mit Antenne über ein fünfadriges abgeschirmtes Audiokabel extern angeschlossen werden.

Die dritte Komponente ist die Frequenzregelschleife. Die OCXO-Frequenz (10MHz) wird zuvor auf die Frequenz des per Software konfigurierten Timepulses vom GPS-Modul heruntergeteilt, um dann verglichen zu werden. Die erforderliche Frequenzteilung wird mit hintereinandergeschalteten Dekadenzählern 74HC390 erreicht. In dem Phasenvergleicher IC 74HC7046 wird der Phasenunterschied zwischen dem Timepulse Rechteck-Signal aus dem GPS Empfänger und dem auf gleiche Frequenz heruntergeteilten Ausgangssignal des OCXO in einem XOR Phasenkomparator ermittelt. Am Ausgang des Phasenvergleichers steht ein gepulstes Rechtecksignal an, dessen Impulsbreite proportional dem Phasenunterschied ist. Ein nachfolgender Tiefpass mit einer Grenzfrequenz im Sub-Hertz Bereich glättet dieses gepulste Korrektursignal zu einer Korrektur-Gleichspannung für den OCXO. Um Rückwirkungen zu verhindern, ist zwischen Tiefpass uns dem OCXO ein Operationsverstärker mit der Verstärkung 1 als Trennglied geschaltet.

Der OCXO hat einen Control-Eingang, über den der Quarzoszillator mit Hilfe einer Spannung zwischen 0 bis 5 Volt in einem Bereich von ca. ±3Hz/V abgestimmt werden kann. Mit der geglätteten Spannung aus dem Phasenvergleicher wird der OCXO auf die Sollfrequenz gezogen. Die Anordnung bildet einen geschlossenen Regelkreis, der die Ausgangsfrequenz des OCXO an den Timepuls des GPS-Empfängers anbindet.

Das u-blox NEO GPS Modul erzeugt im Grundzustand nach dem Einschalten einen Timepuls von 1 Sekunde (1pps). Um auf den gewünschten Timepuls umzuschalten, muss das Modul über seine serielle Schnittstelle umkonfiguriert werden. Diese Aufgabe erledigt ein Arduino-Nano Mikrocontroller Modul. Da diese Konfiguration nur einmal nach dem Einschalten notwendig ist, kann der Controller in der Zwischenzeit damit betraut werden, die Satellitendaten des GPS-Empfängers, den Lock Zustand des Phasenkomparators oder die Abstimmspannung des OCXO abzufragen und über ein LCD-Display anzuzeigen. Das LCD-Display wird über eine I2C Schnittstelle angesteuert.

Sobald der GPS-Empfänger genügend Satelliten empfängt, um einen gültigen Timepuls abzugeben, steht nach der Aufheiz- und Einschwingphase nach etwa 30 Minuten am Ausgang des OCXO ein hochstabiles 10MHz Rechtecksignal zur Verfügung, das mit parallelgeschalteten Buffern (74AC14) 4,8V an 50 Ohm treiben kann. Ein weiterer Buffer Ausgang führt auf eine Erweiterungs-Leiste, mit der ein optionaler Ausgangsverteiler (Fan Out Buffer) das Referenzsignal auf mehrere Ausgänge verteilen kann.

Holdover-Modus

Die GPS-Anbindung sorgt dafür, dass die langfristige Frequenzänderung wie z.B. durch Alterung vollständig ausgeglichen wird. Dieser disziplinierte Modus ist der Standardmodus. Solange ein gültiges Satellitensignal empfangen wird, wird die Ausgangsfrequenz des OCXO mit dem hochgenauen GPS-Signal verglichen und kontinuierlich angepasst.

So lange kein verwertbares GPS-Signal empfangen wird oder wenn der GPS-Empfang ausfällt, übernimmt im Holdover-Modus der OCXO freilaufend die Signalerzeugung und generiert das Ausgangssignal auf der vorher manuell mit einem Poti oder automatisch mit einem Digital-Analog Wandler justierten Soll-Frequenz. Ohne verwertbares GPS-Signal wird die Abstimmspannung im Holdover Modus vom Arduino-Controller über ein Relais automatisch auf einen voreingestellten Wert geschaltet,. Das Gerät fungiert dann als unabhängiges OCXO- Frequenznormal ohne GPS-Anbindung.

Für den Auto-Holdover Modus ist eine Version der Betriebssoftware erforderlich, die dieses Leistungsmerkmal unterstützt [13].

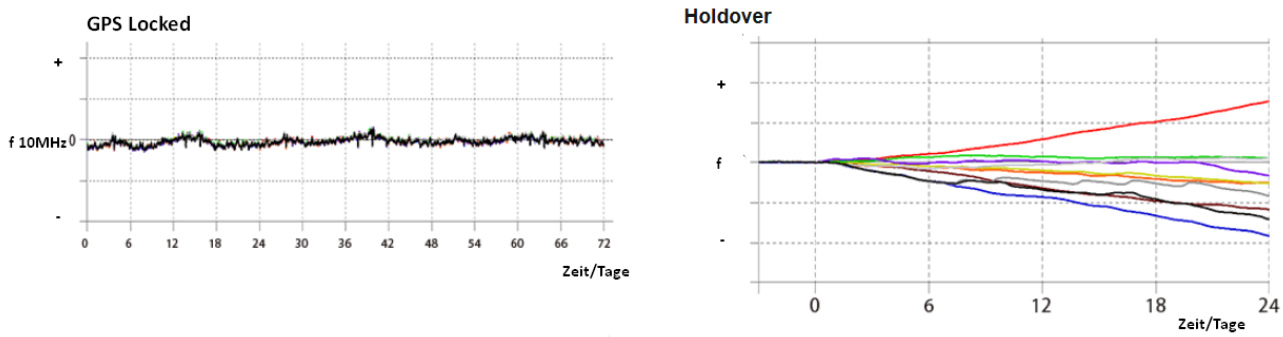


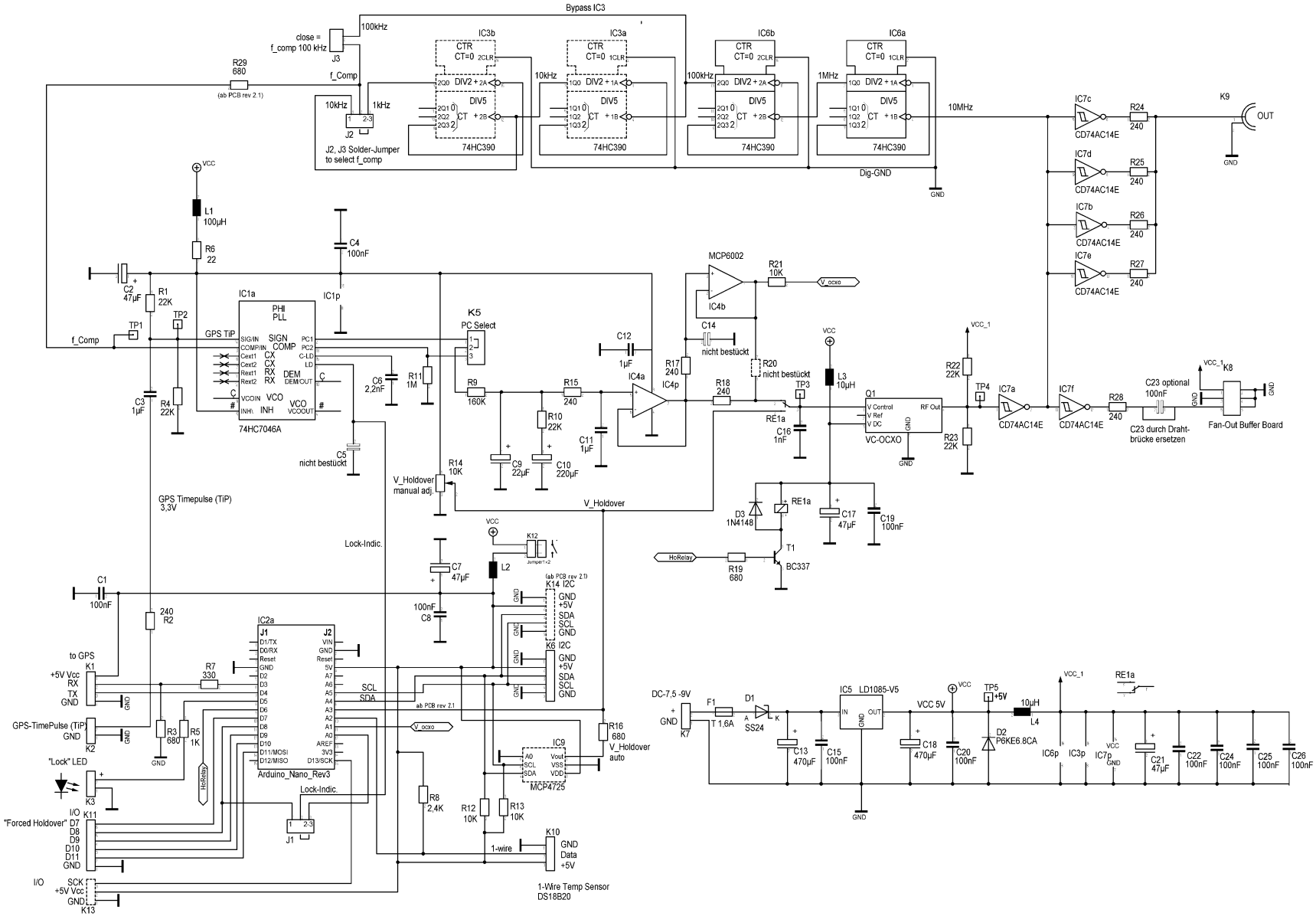
Bild: GPS-disziplinierte Modus im Vergleich zum freilaufenden Holdover Modus eines OCXO

Die Einstellung der Frequenz im Holdover Modus kann entweder durch die manuelle Voreinstellung der Abstimmspannung des VCOCXO (Voltage-Controlled-Ofen-Quarzoszillator) mit dem Potentiometer R14 erfolgen. Oder die Abstimmspannung wird softwaregestützt über einen D/A Wandler erzeugt (noch in Vorbereitung). Die Leiterplatte kann wahlweise entweder für manuelle oder softwaregestützten Holdover bestückt werden.

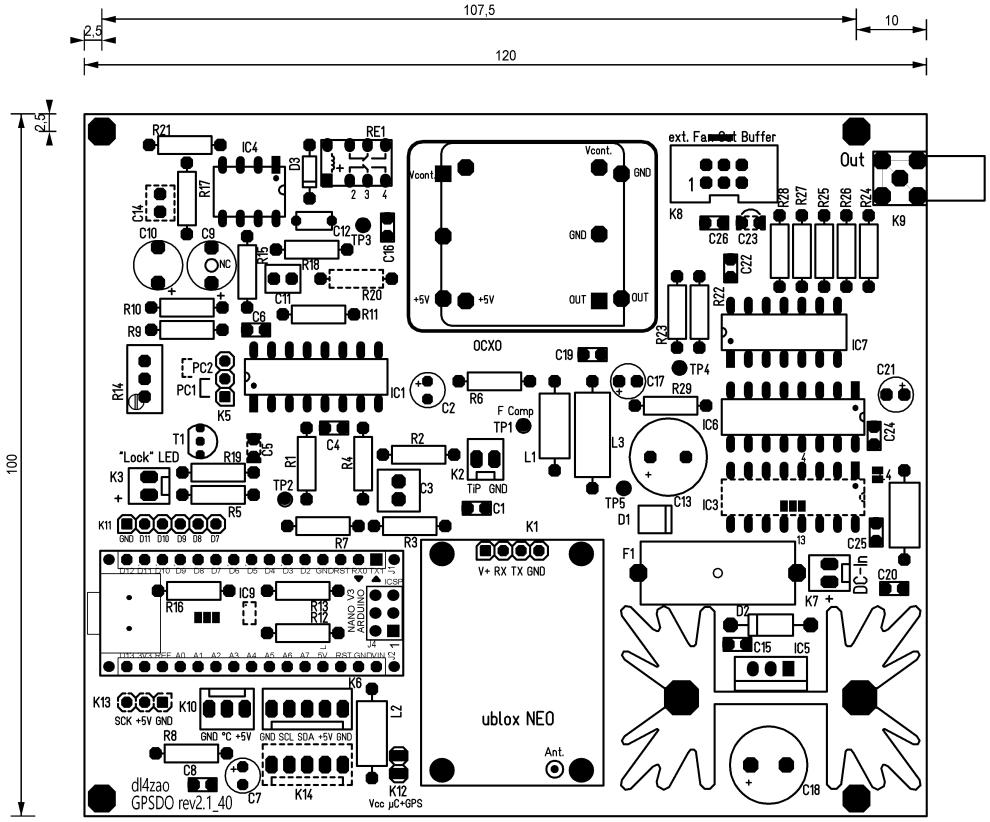
Am einfachsten stellt man mit dem Poti R14 auf die gleiche OCXO Abstimmspannung ein, die sich bei einer gültigen GPS-Anbindung an Testpunkt TP 3 ergibt. Alternativ kann man auch die Ausgangsfrequenz mit dem Poti im Holdover-Modus mit einem hochauflösenden Frequenzzähler justieren, der mit einem genauen Frequenznormal synchronisiert ist. Die Frequenzeinstellung ist von Zeit zu Zeit zu kalibrieren bzw. nachzujustieren.

Beim softwaregestützten Holdover-Modus wird die von der PLL erzeugte Abstimmspannung bei einer gültigen GPS-Anbindung vom µ-Controller gemessen und in regelmäßigen Abständen in einem nichtflüchtigen Speicher hinterlegt. Ohne die Anbindung an das GPS-Signal wird per Software die letztgültig gespeicherte Abstimmspannung über den am I2C Bus hängenden D/A Wandler (IC9) auf den OCXO geschaltet. Ein manuelles Justieren entfällt, da bei der nächsten gültigen GPS Anbindung die richtige Abstimmspannung wieder gespeichert wird.

Schaltbild


Bypass IC3
close = f_comp 100 kHz
J3
f_Comp
J2
J2, J3 Solder-Jumper to select f_comp
100kHz
10kHz
1kHz
IC3b
IC3a
IC6b
IC6a
74HC390
10MHz
Dig-GND
IC7c
IC7d
IC7b
IC7e
CD74AC14E
K9
OUT
R29 680
(ab PCB rev 2.1)
L1 100µH
R6 22
C4 100nF
C2 47µF
R1 22K
TP1
TP2
IC1a
IC1p
74HC7046A
GPS TiP
f_Comp
C3 1µF
R4 22K
C6 2,2nF
R11 1M
C5 nicht bestückt
K5
PC Select
R9 160K
R15 240
R10 22K
C9 22µF
C10 220µF
C12 1µF
C11 1µF
IC4a
IC4p
MCP6002
IC4b
R21 10K
V_ocxo
C14 nicht bestückt
R17 240
R18 240
R20 nicht bestückt
TP3
RE1a
L3 10µH
Q1
VC-OCXO
R22 22K
R23 22K
TP4
IC7a
IC7f
R26 240
C23 optional 100nF
C23 durch Draht-brücke ersetzen
K8
Fan-Out Buffer Board
R14 10K
V_Holdover manual adj.
V_Holdover
GPS Timepulse (TiP) 3,3V
Lock-Indic.
D3 1N4148
C17 47µF
C19 100nF
T1
BC337
HoRelay
R19 680
K12
L2
C7 47µF
100nF C8
C1 100nF
240 R2
IC2a
Arduino_Nano_Rev3
K14 I2C
K6 I2C
GND
+5V
SDA
SCL
to GPS
+5V Vcc
RX
TX
K1
R7 330
GPS-TimePulse (TiP)
K2
R3 680
R5 1K
"Lock" LED
K3
HoRelay
Lock-Indic.
R8 2,4K
R12 10K
R13 10K
IC9
MCP4725
R16 680
V_Holdover auto
I/O
"Forced Holdover"
K11
D7
D8
D9
D10
D11
J1
K10
1-wire
Data
1-Wire Temp Sensor DS18B20
SCK
K13
DC-7,5 -9V
K7
F1
T 1,6A
D1
SS24
IC5 LD1085-V5
VCC 5V
C13 470µF
C15 100nF
C18 470µF
C20 100nF
TP5
+5V
10µH
L4
D2 P6KE6.8CA
IC6p
IC3p
IC7p
C21 47µF
C22 100nF
C24 100nF
C25 100nF
C26 100nF

Bestückungszeichnung



PCB rev 2.1 (punktiert eingezeichntet Bauteile werden nicht bzw. nur optional bestückt)

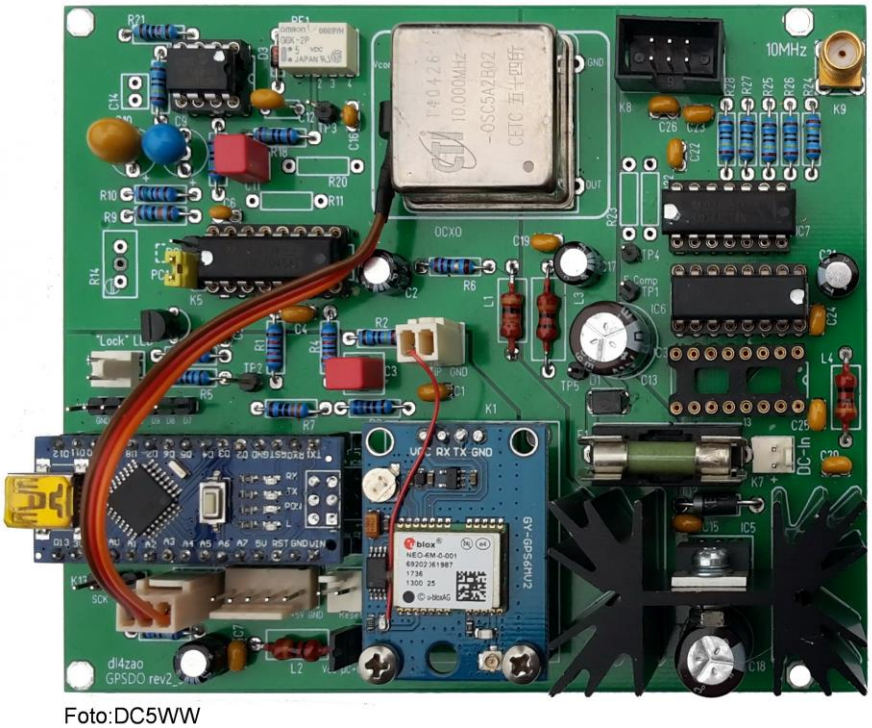


Foto:DC5WW

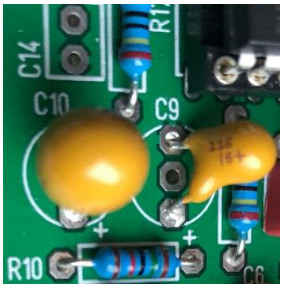
Bild: Ansicht von oben. (nur informativ am Beispiel PCB rev2_37, maßgeblich ist die Bestückungszeichnung oben und die Stückliste). am OCXO ist der optionale Temperaturfühler angebracht

Aufbau

Wichtige Bestückungshinweise

- C9 Tantal Elko 22µF nur im Rastermaß 5mm – die äußeren Lötpins -- bestücken. Das Lötpad in der Mitte (NC) ist nicht angeschlossen!

  Falls dennoch ein Elko mit 2,5mm Rastermaß in dem mittleren NC Pin eingesteckt wird, muss dieser mit einer Lötbrücke an den benachbarten freien Massepin angeschlossen werden.



- Nicht zu bestücken sind: R20, C5, C14.

- bei der Verwendung eines OCXO mit CMOS oder HCMOS-Ausgangspegel sind R22, R23 nicht erforderlich und können entfallen.

- Der optional für den Bedarfsfall vorgesehene DC-Trenn Kondensator C23 zum Erweiterungsstecker zum Fan-Out-Buffer ist nicht zu bestücken. An seiner Stelle ist eine Drahtbrücke einzulöten.

- ***„Holdover-Modus“***
  alternative Bestückung, entweder:
  > Poti R14 zur manuellen Vor-Einstellung der Holdover Abstimmspannung, oder
  > D/A Wandler IC9 (im Schaltbild punktiert gezeichnet) zur softwaregestützten Einstellung der Holdover Abstimmspannung.

  Ohne „Holdover Modus“
  Falls auf die Funktion „Holdover Modus“ ganz verzichtet wird, können Poti R14 bzw. D/A Wandler IC9 und das Umschaltrelais RE1 und dessen Ansteuerung T1, R19, D3 entfallen. Bei nicht-bestücktem Relais RE1 sind dessen Anschluss-Pins 2 und 3 mit einer Drahtbrücke zu verbinden. Damit wird wegen des nunmehr fehlenden Relais-Ruhekontaktes die Abstimmspannung vom GPS-Phasenvergleich zum OCXO durchverbunden.

  Achtung! Es darf nur entweder R14 (manueller Holdover) oder IC9 (S/W Holdover – noch in Vorbereitung) bestückt werden. Beides gleichzeitig ist nicht möglich.

Lötjumper

Die Leiterplatte ist für verschiedene Bestückungsvarianten vorbereitet, die mit Lötbrücken (J2, J3) ausgewählt werden können. Die Lötbrücken befinden sich auf der Unterseite der Leiterplatte.

Auswahl der Phasenvergleichsfrequenz f_comp

Das Schaltbild zeigt die Bauteilwerte für eine Phasen-Vergleichsfrequenz fcomp von 100 kHz. Das NEO GPS-Modul kann per Software auch auf andere Timepuls-Frequenzen konfiguriert werden. Die Leiterplatte erlaubt durch Lötjumper den Frequenzteiler für Vergleichsfrequenzen von 1 kHz, 10 kHz und 100 kHz

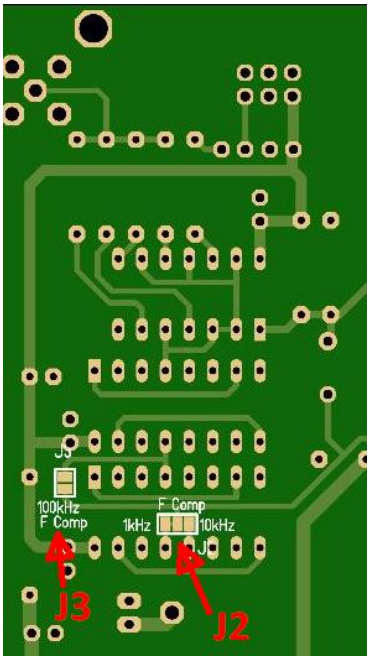
(default) zu setzen. Daneben sollen auch die Bauteilwerte des Schleifenfilters angepasst werden. Die Tabelle zeigt Vorschläge für die Bemessung des Schleifenfilters, die sich in der Praxis weitgehend bewährt haben.

Timepuls fcomp	**R9**	**C9**	**R10**	**C10**	**C6**	**IC3**	**Lötjumper J2**	**Lötjumper J3**
100 kHz (default)	160K	22µF	22K	220µF	2,2 nF	n.b.	egal	closed
10 kHz	160K	100µF	n.b.	n.b.	10nF	bestückt	1 - 2	open
1 kHz	330K	100µF	n.b.	n.b	100nF	bestückt	2 – 3 (default)	open

Tabelle – Bauteilwerte PLL-Schleifenfilters (n.b. = nicht bestückt)

Bei vereinzelten Exemplaren der gebrauchten Surplus VC-OCXO , deren Nachstimmspannung zum Erreichen der 10 MHz durch Alterung zu weit abweicht, kann es vorkommen dass sie bei fcomp von 100 kHz nicht mehr stabil einschwingen. In dem Falle hilft es, auf die 1kHz Variante zu wechseln.

Lötjumper zum Setzen der Teilerfrequenz



- Phasenvergleichsfrequenz von 100kHz (default Variante, wie im Schaltbild gezeichnet):
  IC3 entfällt, nicht bestücken. 2-pol. Lötjumper J3 (Bypass IC3) auf der Platinen Unterseite schließen.

- Phasenvergleichsfrequenz von 1kHz:
  IC3 bestücken. J3 (Bypass IC3) offen lassen.

- Phasenvergleichsfrequenz von 10kHz:
  IC3 bestücken. Bei dem 3pol. Lötjumper J2 erst die Leiterbahn zwischen den Lötpins 2-3 auftrennen. Dann die Lötpins 1-2 mit einem Lötklecks überbrücken und schließen.
  J3 (Bypass IC3) offen lassen.

An Messpunkt TP1 kann die eingestellte Phasenvergleichsfrequenz f_comp geprüft werden. An Messpunkt TP2 kann die eingestellte Timepuls-Frequenz TiP geprüft werden.

Funktion der Steckverbinder und Jumper

- K1, 4-polige Pfostenleiste
  zum Aufstecken oder zum Anschluss von Stromversorgung und serieller Schnittstelle des NEO GPS Moduls

- K2, 2-polige Pfostenleiste Timepuls und GND.
  Eingang des Timepulse Referenztaktes vom GPS-Modul.

- K3, 2-polige Pfostenleiste „Lock“ LED und GND
  optional - Anschluss einer LED als PLL-Lockindikator

- K5, 3-polige Pfostenleiste mit aufgesteckter Steckbrücke zwischen Pins 1-2 (default)
  Auswahl des Phasendiskriminators PC1 (Standard) und PC2

- K6, (K14 optional) 5-polige Pfostenleiste „I2C Bus“
  Anschluss eines Displays mit I2C Schnittstelle

- K7, 2-polige Pfostenleiste „DC-In“, +U_b und GND
  Eingang für DC Versorgungsspannung, nominell 7 – 9V, stabilisiert und gesiebt, Strom: max. 1A

- K8, 6-polige Wannenstecker „Fan-Out Buffer Board“, (+5V Vcc, GND, 10 MHz)
  Anschluss für eine Erweiterungsplatine mit aktivem Treiber für zusätzliche Ausgängen

-
- K9, SMA-Buchse
  Ausgang 10 MHz Referenzfrequenz, 5V CMOS, 50 Ohm Innenwiderstand

- K10, 3-polige Pfostenleiste „1-Wire Bus“,
  optional zum Anschluss von 1-Wire-Bus Temperaturfühlern

- K11, 6-polige Pfostenleiste „I/O“,
  optional herausgeführte Digital I/O Pins des Arduino Nano

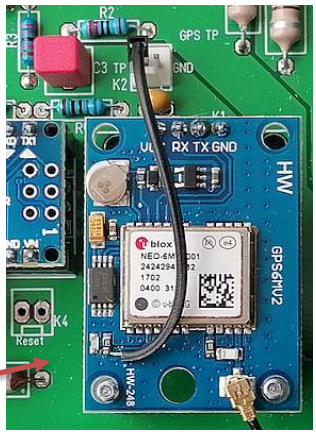
- K12, 2-polige Pfostenleiste mit aufgesteckter Steckbrücke
  zur Abtrennung der Stromversorgung von Arduino, Display und GPS Module bei externer USB-Versorgung bei der Programmierung des Arduino und zu Debug Zwecken.

- K13, 6-polige Pfostenleiste „I/O“,
  optional herausgeführte SPI/SCK Pin des Arduino Nano

- „Reset“ auf dem Arduino Nano - ICSP Pfostenleiste
  optional zum Anschluss eines externen Reset Tasters (siehe Bild in Abschnitt Arduino Nano v3)
-

Anschluss des NEO - GPS Modul

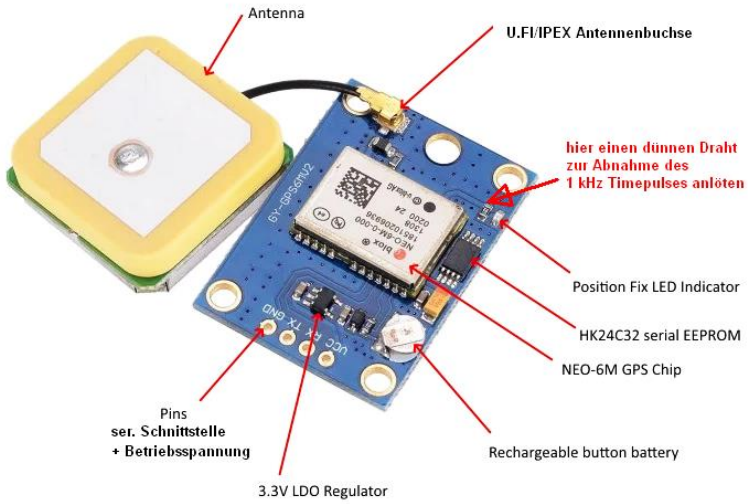
Das GPS Modul wird über zwei Konnektoren angeschlossen. Es wird auf die Steckverbindung K1 aufgesteckt und am hinteren Ende mit Abstandshaltern auf der Leiterplatte befestigt.



Über den 4-poligen Verbinder K1 werden 5V Betriebsspannung (Vcc), Masse (GND) und zwei serielle Datenleitungen (RX, TX) verbunden.

Auf den Konnektor K2 auf der Leiterplatte wird das 1kHz Timepulse (TiP) Signal aufgelegt . Auf dem GPS Empfänger-Modul ist dafür kein Konnektor vorhanden.

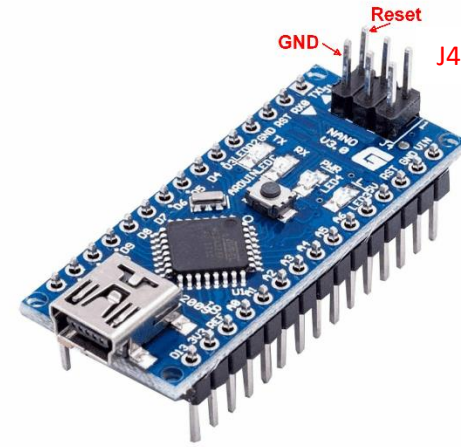
Das TP Signal wird am Vorwiderstand der Timepuls LED abgenommen. (Einige Module haben dafür einen Anschlusspin) Hierzu vorsichtig einen dünnen Draht an der Seite des Widerstands, die zum u-blox-Modul führt, anlöten. Siehe Hinweis im Bild unten und rechts:



Die mit dem GPS-Modul oft im Bundle mitgelieferten Patch-Antenne (wie im Bild oben) ist für optimalen Empfang nicht erste Wahl. Es empfiehlt sich, für den Regelbetrieb eine Außenantenne mit freier Sicht auf den Himmel zu verwenden. Hierzu benötigt man ein Pigtail Koax-Adapterkabel von IPEX auf eine SMA-Buchse. Darüber kann eine externe GPS-Aktivantenne mit SMA Anschlusskabel angeschlossen werden.

Arduino Nano v3

Der µ-Controller ist mit zwei 15-poligen Stiftleisten zum Aufstecken auf die Leiterplatte versehen. Für das Gegenstück auf der Leiterplatte wurden aus Kostengründen zwei günstige 16-polige Buchsenleisten in der Stückliste aufgeführt. Davon werden nur jeweils 15 Steckplätze gebraucht. Man hat die Wahl, entweder die Buchsenleisten auf 15 Steckplätze zu kürzen (Vorsicht Bruchgefahr) oder die Leiste original 16-polig auf der Leiterplatte zu bestücken und die nicht belegten Steckplätze am Ende der Leiste z.B. mit Kleber zu blockieren, so dass die Gefahr einer versehentlichen Fehlsteckung mit falschen Verbindungen verhindert wird.



Auf dem Arduino Nano befindet sich die 6-polige ICSP Pfostenleiste J4 und ein SMD Drucktaster für die Reset Funktion. Zusätzlich kann der Reset auf ICSP Pfostenleiste (J 4) zu einem externen Reset Taster verdrahtet werden. (Bild: Taster zwischen „Reset“ und GND)

Laden der Software auf den Arduino

Es sind derzeit zwei Varianten einer Betriebssoftware verfügbar und erprobt:

- Basis-Version von Michael, DL7UKM auf der Grundlage von F1CJN. Kontakt: dl7ukm@darc.de
- alternative Version von Rainer Wieland: https://www.gpsdo.de/

Vor der Inbetriebnahme ist der Software-Sketch mit der Betriebssoftware auf den Arduino Nano zu laden. Wie das geht, ist auf der Seite von Arduino https://www.arduino.cc/ oder in den zahlreichen Tutorials im Web beschrieben.

In der Betriebssoftware ist in der entsprechenden Programmzeile vorher einzutragen, dass der Timepuls des NEO6/7 Moduls mit der Phasenvergleichsfrequenz initialisiert wird, für die die Hardware vorbereitet ist (100kHz, 10kHz, 1kHz). Quelle für den Arduino Sketch mit der Betriebssoftware, siehe in der Stückliste unter Pos. 62.

Das Flashen der Software erfolgt über die USB-Schnittstelle und den Bootloader des Arduino Nano. Man kann den Controller vor dem Einbau extern oder im eingebautem Zustand programmieren. Um bei eingebautem Arduino-Nano zu vermeiden, dass der komplette GPSDO „rückwärts“ über die Arduino USB-Schnittstelle mit Spannung versorgt wird, empfiehlt es sich zur Sicherheit, beim Programmieren über USB vorher die Steckbrücke von Jumper K12 zu ziehen. Dadurch wird die Stromversorgung von Arduino, Display und GPS-Modul vom Restgerät getrennt. Der Arduino lässt sich im Grunde auch ohne diese Trennung und mit anliegender Betriebsspannung des GPSDO programmieren. Man muss dann aber dafür sorgen, dass die Betriebsspannung des Geräts bereits anliegt, bevor das USB Kabel zum PC oder Notebook angeschlossen wird.

Hinweis: Arduino Nano V3 kompatible Boards mit ATMega 328p Mikrocontroller, die im Web günstiger als das Original angeboten werden, sind genauso geeignet. Die Module aus fernöstlicher Fertigung verwenden als USB-to-Serial Wandler einen CH340g Baustein; im Original Arduino Nano ist ein FTDI Chip verbaut. Windows 10 erkennt normalerweise den Baustein und verwendet den richtigen Treiber. Bei Problemen kann der CH340g Treiber im Web heruntergeladen werden. Eine Anleitung zur Installation findet sich hier: https://www.makershop.de/ch340-341-usb-installieren/

Test- und Messpunkte

- TP1: f_comp
  Rechtecksignal der heruntergeteilten Phasen-Vergleichsfrequenz. 0/5V mit 50% Tastverhältnis

- TP2: Timepuls
  Rechtecksignal der per Software konfigurierten Timepuls Frequenz, ca. 3,3Vss. Referenzsignal für den Phasenvergleich.

- TP3: V-OCXO
  Abstimmspannung des OCXO. Stammt entweder aus dem Phasenvergleich mit der GPS Referenz oder voreingestellt im Holdover Modus. Der Wert liegt im Bereich zwischen 0,5 und 4,5V.

- TP4: OCXO-Ausgang
  10MHz Ausgangssignal des OCXO vor dem Ausgangstreiber.

- TP5: +5V Betriebsspannung
  Betriebsspannung nach dem 5V Spannungsregler

Inbetriebnahme

- Im ersten Schritt die korrekte Bestückung der Bauteile sorgfältig kontrollieren und - am besten mit Hilfe einer Lupe - die Lötstellen und Leiterbahnen auf Kurzschlüsse und schlechte Lötstellen prüfen. Gegebenenfalls Flussmittelreste mit Iso-Propanol entfernen. Sorgfältig die richtige Polarität und Einbaurichtung der Dioden, Transistoren und der Elkos prüfen.

- Die Betriebsspannungs-Versorgung wird über die DC-Anschluss-Pfostenleiste K7 angeschlossen. Dabei auf die richtige Polarität achten. Die DC-Stromversorgung soll stabilisiert und möglichst frei von Brumm und Störimpulsen sein. Billige Stecker-Schaltnetzteile ohne ausreichende Siebung und Entstörung können die Qualität des Ausgangssignals beeinträchtigen.

- Für die Inbetriebnahme empfiehlt sich die Speisung mit einem stabilisierten Labor Netzgerät mit einstellbarer Spannung und Strombegrenzung. Die Strombegrenzung wird auf 1A eingestellt. Dann

die Spannung langsam von 0 auf max. 9V hochregeln. Wenn die Spannung dabei zusammenbricht ist noch ein gravierender Fehler vorhanden, der erst beseitigt werden muss. Der empfohlene Versorgungsspannungsbereich liegt zwischen 7 und 9V. Bei höheren Versorgungsspannungen kann die entstehende Verlust-Wärme zur Überhitzung der Spannungsregler führen.

- Nach dem Einschalten, in der Hochheizphase des OCXO, fließt ein höherer Strom als im Dauerbetrieb. Nach wenigen Minuten, sobald der Quarzofen aufgeheizt ist, geht die Stromaufnahme auf Werte zwischen 300 und 400mA zurück.

- Wenn die Software auf den Arduino geladen ist, das GPS Modul aufgesteckt und die Timepulsleitung verbunden ist, muss nach dem Einschalten nach einiger Zeit die Timepuls LED des GPS Moduls leuchten. Die GPS-Antenne soll dazu freie Sicht zum Himmel haben. Durch die hohe Timepuls Frequenz leuchtet die Timepuls LED fürs menschliche Auge dauerhaft. An den Testpunkten TP1 und TP2 können die Rechtecksignale der Vergleichsfrequenz aus dem Frequenzteiler und der Timepuls aus dem GPS mit dem Oszilloskop überprüft werden. Beide sollen die gleiche Frequenzlage aufweisen.

- Die Abstimmspannung des OCXO an TP3 muss bei gültigem GPS-Signal nach einigen Minuten eingeschwungen sein einen stabilen Wert zwischen typisch 1 und 3,5V einnehmen. Die „Lock“ LED oder die Lock Anzeige im Display muss den eingeschwungenen Zustand der PLL anzeigen. An Testpunkt 4 und am Ausgang steht ein stabiles 10MHz Rechteck-Signal an. Das Rechteck ist nicht ideal geformt, sondern weist nach den Flanken ein deutliches Einklingeln auf. Das ist eine normale Eigenschaft des Ausgangstreibers.

- Der GPSDO braucht mindestens 20 Minuten und länger, bis der OCXO im thermischen Gleichgewicht ist und bis die PLL komplett eingeschwungen ist. Der Empfang von mindestens 4, besser aber mehr Satelliten ist für einen gültigen Phasenvergleich erforderlich. Es wird empfohlen, den GPSDO vor dem Gebrauch als Frequenznormal über mehrere Stunden einlaufen zu lassen.

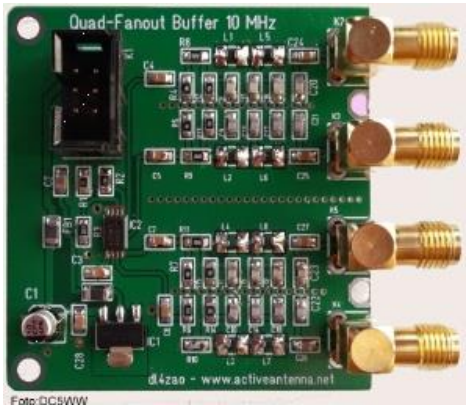
Qualitätsbestimmende Faktoren

- GPS-Antenne mit freier Sicht zum Himmel (bevorzugt: Außenantenne). Der Empfang von mindestens 4 Satelliten ist erforderlich. Der Empfang von 8 oder mehr Satelliten ergibt eine bessere Stabilität.
- Der GPSDO soll mehrere Stunden einlaufen, bevor er als Frequenznormal verwendet wird.
- Der OCXO bestimmt die Kurzzeitstabilität (Phasenrauschen, Jitter)
- Die GPS-Anbindung sorgt für Frequenz-Genauigkeit und Langzeitstabilität (Stunden, Tage, Monate)
- Ein schlechter OXCO wird durch die GPS-Anbindung nicht besser, lediglich die Langzeit Drift wird ausgeregelt.

Zusatzbaugruppe 4 x Fanout-Buffer

Option: Vierfach-Fanout Buffer als Erweiterung für den Simple-GPSDO oder andere 10 MHz Taktquellen um vier zusätzliche Signalausgänge mit Sinus- oder Rechtecksignal. Die Verbindung zur GPSDO Platine erfolgt über ein 6-poliges Flachbandkabel.

Link zur Baumappe (pdf):
https://www.dl4zao.de/_downloads/Vierfach_Fan_Out_Buffer-BM.pdf



Referenzen und weiterführende Informationen

[1] Ulrich Bangert DF6JB † „Über die Stabilität von Oszillatoren und Frequenznormalen“

[2] J.R. Millller, G3RUH "Simple GPS-stabilized 10MHz Oscillator"

[3] Alain Fort, F1CJN “NE0-7M with Arduino to replace the 10 KHz from GPS Rockwell Jupiter”

[4] Michael Knietzsch, DL7UKM: http://www.dl7ukm.de/

[5] u-blox NEO GPS Module: https://www.u-blox.com/en/product/neo-6-series?lang=de

[6] TI Datenblatt: CD74HC7046A, CD74HCT7046A, Phase-Locked Loop with VCO and Lock Detector

[7] TI Applikationsschrift: CMOS Phase-Locked-Loop Applications Using the 74HC4046A

[8] IEEE, Tutorial „Precision Frequency Generation Utilizing OCXO and Rubidium Standard”

[9] Bliley Guide to OCXO : https://blog.bliley.com/choosing-best-quartz-crystal-oscillator

[10] Jörg Logemann, DL2NI: „GPS disziplinierter Normalfrequenzoszillator“

[11] David W. Allan, N. Ashby, C.C. Hodge: „The Science of Timekeeping“, HP Application Note 1289

[12] Bernd Neubig, DK1AG: Das große Quarzkochbuch, Kapitel 7 “Kurzzeitstablität“

[13] Simple GPSDO Betriebssoftware mit Holdover von Rainer: https://www.gpsdo.de/

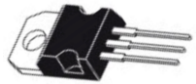
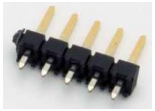
Praktische Tipps im kleinen Werkstattbrevier (pdf) zum Herunterladen
http://www.dl4zao.de/_downloads/Werkstattbrevier.pdf

Stückliste

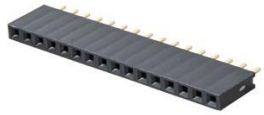
(PCB rev2, Bauteilwerte für Phasenvergleichsfrequenz 100kHz. Im Schaltbild punktiert eingezeichnete Bauteile werden nicht bzw. nur optional bestückt. Mechanische Teile wie Schrauben, Muttern, Abstandsbolzen oder Gehäuse sind nicht enthalten.

Pos.	Anzahl	Bauteil Nr.	Wert / Type	Beschreibung / Typ	Pitch mm/ Package	Bildmuster (kann typbedingt abweichen)
1	10	C1,C4,C8, C15,C19, C20,C22,C24,C25,C26	100nF	Vielschicht Keramik C, X7R	RM 2,54	
2	-	(C23)	Drahtbrücke	C23 durch Brücke ersetzen	RM 2,54	
3	1	C5	Wird nicht bestückt		RM 2,54	
4	1	C16	1nF	Vielschicht Keramik NP0C	RM 2,54	
5	1	* C6 [1)]	2,2nF	Vielschicht Keramik C	RM 2,54	
6	1	C12	1µF	Vielschicht Keramik C, X7R oder Z5U	RM5	
7	2	C3,C11	1µF /50V	Folienkondensator WIMA MKS-02, PET film-cap	RM 2,54	
8	1	* C10 [1)]	220µF	Tantal Kondensator, 10V	RM 5	

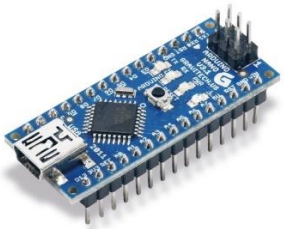
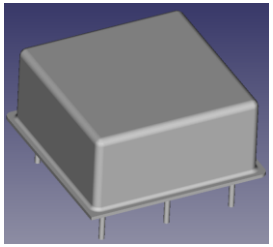
9	1	* C9 [1)]	22µF	Tantal Kondensator, 10V	RM 5 !	
10	4	C2,C7,C17,C21	47µF	Elko Radial, 35V Low ESR, 105°C	RM 2,5 D6mm	
11	2	C13,C18	470µF	Elko Radial, 35V. Low ESR, 105°C,	RM 5,08 D11mm	
12	1	D1	SS24	2A Schottky Diode, 40V	DO-214	
13	1	D2	P6KE6,8A altern. P6KE6,8CA	TVS Überspannungs-Schutzdiode	DO15	
14	1	D3	1N4148	Si-Universaldiode	DO35	
15	1	IC1	CD74HC7046AE	PLL IC mit Lock Detector	DIL16	
16	1 * 2	IC6 * IC3 [1)]	74HC390	Dual Decade Ripple Counter	DIL16	
17	1	IC7	74AC14	Hex Schmitt Trigger Buffer/Inverter	DIL14	

18	1	IC4	MCP6002	Dual CMOS Rail-to-Rail OpAmp	DIL8	
19	1	IC5	LM1085-IT5 oder LD1085-V50	+5V / 2,5A Low-Drop Festspannungsregler,	TO220	
20	1	* IC9 bitte beachten: Fußnote 2)	MCP4725A0T-E/CH	12Bit DAC, I2C	SOT23-6	
21	1	K1	Buchsenleiste 4pol	Zum Aufstecken des GPS NEO Modul	RM 2,54	
22	1	K12 3)	Pfostenleiste	2-Pin Pin-Header	2,54mm	
23	2	K5, 3) K13 (optional)	Pfostenleiste	3-Pin Pin-Header	2,54mm	
24	1	K11 (optional) 3)	Pfostenleiste	6-Pin Pin-Header	2,54mm	
25	2	K5-J, K12-J,	Jumper	Kurzschlussbrücke		
26	4	K2,K3,K4,K7	2pin Header	Platinensteckverbinder 2-pol Pfosten und Stecker mit Kabel	2,54mm	

27	1	K10	3pin Header	Platinensteckverbinder 3-pol Pfosten und Stecker mit Kabel	RM2,54	
28	1	K6	5pin Header	Platinensteckverbinder 5-pol Pfosten und Stecker mit Kabel	RM2,54	
29	1	K8	WANNENSTECKER 06-ST	Platinensteckverbinder 6-pol	RM2,54	
30	1	K9	SMA Buchse	SMA Einbaubuchse gerade oder gewinkelt		
31	1	L1	100µH	Festinduktivität axial Fastron SMCC oder äquivalent		
32	1	L4	10µH	Festinduktivität axial Fastron SMCC oder äquivalent		
33	1	L2	EMV-Ferrit	Fastron Bead/4 -900R-02 oder äquivalent		
34	1	L3	10µH	Festinduktivität axial Fastron HBCC oder äquivalent		
35	1	R6	22 Ohm	Widerstand Metallschicht 1%	0207	
36	9	R2,R15,R17,R18,R24,R25, R26,R27, R28	240 Ohm	Widerstand Metallschicht 1%	0207	

37	1	R7	330 Ohm	Widerstand Metallschicht 1%	0207	
38	4	R3,R16,R19, R29 (ab PCB rev. 2.1)	680 Ohm	Widerstand Metallschicht 1%	0207	
39	1	R5	1 KOhm	Widerstand Metallschicht 1%	0207	
40	1	R8	2,4 KOhm	Widerstand Metallschicht 1%	0207	
41	3	R12,R13,R21	10 KOhm	Widerstand Metallschicht 1%	0207	
42		absichtlich leer				
43	5	R1,R4,R10,R22,R23	22 KOhm	Widerstand Metallschicht 1%	0207	
44	1	R9	180K	Widerstand Metallschicht 1%	0207	
45	1	R11	1MOhm	Widerstand Metallschicht 1%	0207	
46	1	* R14 bitte beachten: Fußnote 2)	10K-lin	64W-10K Präzisionstrimmer stehend	RM2,54	
47	1	RE1	Relais	OMRON G6K-2P-Y-5V (PCB Version 2.1_40) OMRON G6K-2P-5V (PCB 2_37)		
48	1	T1 [3]	BC337	NPN Silizium Transistor	TO92	
49	2	IC2-Sockel	Sockelleiste für Arduino	Buchsenleiste 16-polig *nur als 15 polig benutzt.	RM 2,54	

50	1	Abbruchleiste für K5, K11,K12,K13,	Pin header	Stiftleiste 40 polig zum Abbrechen für K5, K11, K12,K14	RM 2,54	
51	3	IC Sockel DIL	IC Sockel 16 polig		RM 2,54	
52	1	IC Sockel DIL	IC Sockel 14 polig		RM 2,54	
53	1	IC Sockel DIL	IC Sockel 8 polig		RM 2,54	
54	1	F1	Sicherungshalter	Für Feinsicherungen 5x20mm		
55	1	F1-S	Feinsicherung T 1,6A	G-Feinsicherungseinsatz träge 5 x 20mm – 10Stk. Packung (Rabatt)		
56	1	IC5-KK	Kühlkörper TO220	Aluminium Strangkühlkörper Fischer SK129-25		

57	1	IC2	Arduino Nano V3 (ATMega 328p µC)	Hinweis: Es muss nicht das teure Original sein. Günstige kompatible Arduino Nano V3 Nachbauten mit ATMega 328p µ-Controller gibt es von diversen Anbietern im In- und Ausland.	RM 2,54	
58	1	GPS	GPS Empfänger-Modul mit Antenne u-blox NEO-6M u-blox NEO-7M	Zum Beispiel Modul: u-blox NEO-6M GY-GPS6MV2 oder NEO-7M		
59	1	LED	3mm LED grün	2mA LED Als PLL „Lock“ Anzeige		
60	1	Q1	VC-OCXO 10 MHZ	Diverse, mit +5V Betriebsspannung und Freq. Control Eingang (VC-OCXO) z.B. Bliley NV47 ENE 3311B CTI OSC5A2B02 u.v.a.		
61	1	Optional Temperaturfühler	DS18B20	Temperatursensor, I2C Bus	TO92	
62	1	Optional R11	1 Megohm	Widerstand Metallschicht 1%	0207	

63	1	Optional – I2C Display Betriebsanzeige	HD44780 1602 Display – 16char/2 Zeilen HD44780 2004 LCD Display 20char/4-Zeilen	Bundle mit I2C Schnittstellenmodul		
64	1	Optional, bei Außenantenne	Adapterkabel SMA-Buchse – IPEX Stecker	Adapterkabel (WLAN Pigtail) U.FL bzw. IPEX auf SMA Zum Anschluss einer externen GPS Antenne an das NEO-GPS-Modul über SMA		
65	1	Optional Außenantenne	Externe GPS Antenne	GPS Aktiv-Antenne mit SMA Koax-Anschlusskabel Wasserdicht, für Außenmontage geeignet.		
66		Arduino Betriebs-Software	Basis Software von F1CJN (zip) http://f6kbf.free.fr/html/NEO-7M_Arduino_Jupiter_10KHz.zip Von Michael Knietzsch, DL7UKM für den Simple-GPSDO adaptierte Software über seine Webseite: http://www.dl7ukm.de/ oder per mailanfrage an dl7ukm@darc.de			
67		Arduino Betriebs-Software	Alternative Betriebssoftware von Rainer Wieland mit Auto-Holdover (ab PCB rev.2.1) Info auf https://www.gpsdo.de/, Kontakt: mailto:Software@GPSDO.de			

*** Fußnoten zur Stückliste**:

1) Bauteilwerte für diese Pos. gelten für Vergleichsfrequenz 100kHz. Bei Vergleichsfrequenzen 1KHz und 10 kHz abweichende Bauteil-Werte, IC3 2Stk erforderlich.
2) Holdover Funktionalität - alternative Bauteilbstückung. Entweder Trimmpoti R14 für manuell eingestellten Holdover - oder IC9 für automatischen S/W Holdover (In Planung). Nicht Beide Bauteile gleichzeitig bestücken. Bei Verzicht auf die Holdover Funktionalität entfallen neben IC9 bzw. R14 dazu noch die Bauelemente R16, R19, T1. Relais RE1 wird durch eine Drahtbrücke ersetzt.
3) Stiftleisten sind Teilstücke von Pos. 49 – Pin Header 20polig

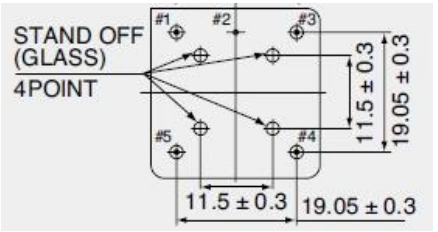
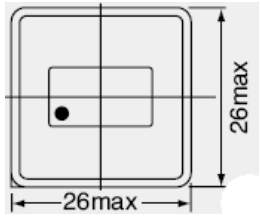
Link zu einem Warenkorb der Firma Reichelt: https://www.reichelt.de/my/1681111

Der Warenkorb ist ohne Gewähr auf Richtigkeit und Vollständigkeit und dient lediglich zur Orientierung für die Spezifizierung der verwendeten Bauteile. Gleichwertige Bauteile sind auch von anderen Händlern oder zu günstigeren Preisen erhältlich. Günstigere Angebote gibt es beispielsweise für Arduino Nano V3 kompatible Nachbauten und für die SMA-Buchsen. Der Reichelt-Warenkorb ist nicht komplett, einige Bauteile der Stückliste sind nicht im Lieferprogramm von Reichelt gelistet und müssen von anderen Quellen beschafft werden:

- IC1: 74HC7046 - DIL-16
- IC7: 74AC14 - DIL14
- 10 MHz VC-OCXO
- LCD-Display
- ext. GPS-Antenne
- u-blox NEO-6M oder NEO-7M GPS Modul (Anmerkung: vereinzelt sind Fake- ublox-Module im Handel aufgetaucht, die statt mit einem ublox Chip im Inneren mit einem nicht kompatiblen chinesischen GPS Chip bestückt sind. Bei diesen Modulen kann der Timepuls nicht per Software umgestellt werden)

Tabelle verwendbarer Oszillatortypen

Die Liste zeigt exemplarisch Typen von ausgemusterten oder Neuware Oszillatoren, die für die Verwendung für den Simple-GPSDO geeignet sind. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, alle Angaben sind ohne Gewähr. Mehr Info und Daten von OCXO auf der Webseite von DL7UKM [4]

Hersteller/ Typ	VCC	Warmup / continuous Operation	Intern V_{Ref}	$V_{Control}$ (EFC)	Output Waveform / Output-Level	Oszillator Typ	Gehäuse-Footprint	Bildmuster kann typbedingt abweichen
Bliley/ NV47A1282	+5 V	5W / 2W	+4 V	0 – 4 V	Sinus / 7 dBm	VC-OCXO	36 x 27 x 20 (Europack)	
CTI/ OSC5A2B02	+5 V	<500 mA / <250 mA	None	0 – 4 V	Square Wave / CMOS	VC-OCXO	25 x 25	
NDK/ ENE3311	+5 V	<600 mA / <250 mA	None	0 – 4 V	Square Wave / CMOS	VC-OCXO	25 x 25mm	

Hersteller/ Typ	VCC	Warmup / continuous Operation	Intern V_{Ref}	$V_{Control}$ (EFC)	Output Waveform / Output-Level	Oszillator Typ	Gehäuse-Footprint	Bildmuster kann typbedingt abweichen
Isotemp/ OCXO 131-100	+5 V		None	0 – 4 V	Square Wave / CMOS oder Sinus 10dBm	VC-OCXO	36 x 27 x 20 (Europack)	
Isotemp/ OCXO 143 Serie Nur A-Typ- Pin-Connection	+5 V	<700 mA / 1W	Option	0 – 4 V	Square Wave / CMOS	VC-OCXO	25 x 25	

Etwas Hintergrundwissen zum Verständnis der Begriffe

Genauigkeit und Stabilität eines Oszillators sind nicht das Gleiche

Der folgende Absatz zitiert aus einer Abhandlung von Ulrich Bangert DF6JB †
„Über die Stabilität von Oszillatoren und Frequenznormalen“ [1].

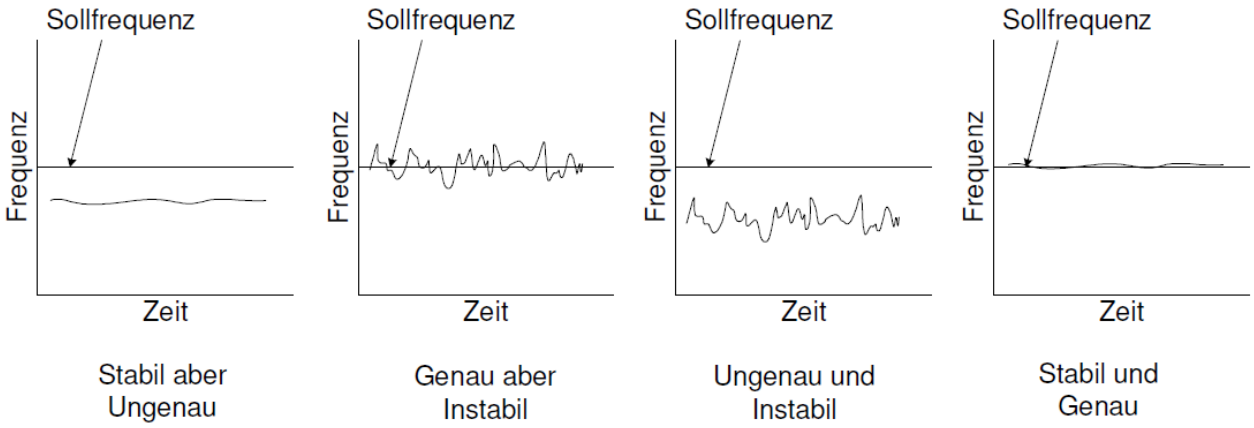


Bild: Genauigkeit und Stabilität

- Genauigkeit: Abweichung vom Soll-Wert der Frequenz
- Stabilität: Statistische Verteilung der Abweichungen vom Sollwert über einen bestimmten Zeitraum
- Als Maß für die Stabilität eines Oszillators dient die Allan-Deviation

Genauigkeit und Stabilität eines Oszillators werden allgemein ausgedrückt als Verhältnis ppm (10^{-6}) oder ppb (10^{-9}) relativ zum Sollwert der Frequenz. Wie sich bei Frequenz-Messungen an realen Oszillatoren zeigt, erhalten wir nicht immer den gleichen Messwert, sondern die Messwerte schwanken mit einer gewissen Breite um einen mittleren Wert herum.

Die Angabe einer Stabilität ohne die gleichzeitige Angabe der Beobachtungszeit für diese Stabilität ist nutzlos. Angaben wie „Die Kurzzeitstabilität beträgt 1 x 10^{-11}“ sind wertlos, soweit man nicht genau spezifiziert, welche Beobachtungszeit man exakt unter „Kurzzeit“ verstehen möchte. Man kann auch nicht die Stabilität für einen ganzen Zeitbereich angegeben, sondern es ist eine Größe, die ganz konkret an eine einzelne Beobachtungszeit gekoppelt ist. Das gilt ganz analog natürlich auch für die oft zitierte „Langzeitstabilität“. Der Beobachtungszeitraum ist der Zeitabstand derjenigen Messwerte, die man für die Berechnung der Allan-Deviation benutzt.

Allan Deviation und Sigma Tau Diagramm

Das nach dem Physiker David Allan benannte Maß dient zur Charakterisierung der Stabilität eines Oszillators oder einer Uhr. Eine geringe Allan-Varianz ist ein Merkmal eines Oszillators mit hoher Stabilität über den gemessenen Zeitraum. Die Allan-Varianz hängt von der zeitlichen Auflösung der Messdatenerfassung ab. Sie beruht auf einer statistischen Mittelwertbildung ähnlich wie bei der Standardabweichung. Bei der Standardabweichung wird über die Quadrate der Abstände der

einzelnen Messwerte vom Mittelwert summiert. Allan ersetzte dies durch eine Summation über die Quadrate der Abstände aufeinander folgender Messwerte. Es werden also die Mittelwerte jeweils zweier aufeinanderfolgender Messungen gebildet.
Die Allan Deviation ist die Quadratwurzel aus der Allan Varianz [11].

Die Allan Deviation eines Oszillators stellt man übersichtlich in einem Sigma-Tau-Diagramm grafisch dar. Das Sigma-Tau-Diagramm stellt in einem doppelt-logarithmischen Diagramm über den interessierenden. Bereich von Beobachtungszeiten die Allan-Deviation ϭ (Sigma) eines Oszillators auf der vertikalen und die gemittelte Beobachtungszeit τ (Tau) auf der horizontalen Achse dar.

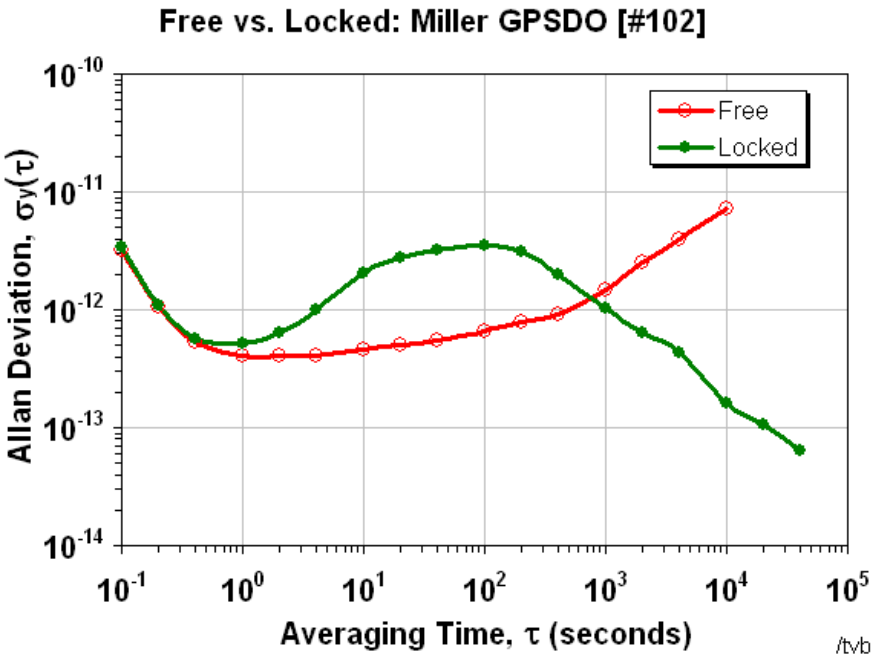
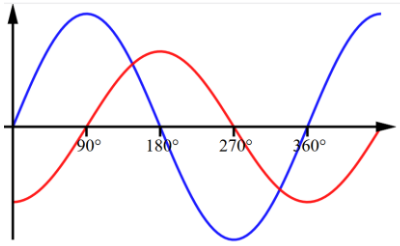


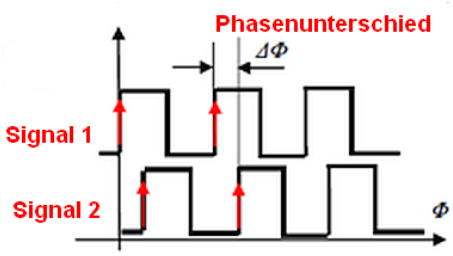
Bild: Allan Deviation des G3RIJ Simple GPSDO. Freilaufend und mit GPS-Anbindung

Phasenverschiebung

Die Phasenverschiebung, auch Phasendifferenz oder Phasenlage, ist ein Begriff im Zusammenhang mit periodischen Vorgängen.

- Zwei Sinusschwingungen sind gegeneinander phasenverschoben, wenn die Zeitpunkte ihrer Nulldurchgänge nicht gleich sind.
- Bei Digitalsignalen nimmt man nicht den Nulldurchgang, sondern besser die ansteigende oder absteigende Flanke zum Vergleich für den Phasenunterschied.



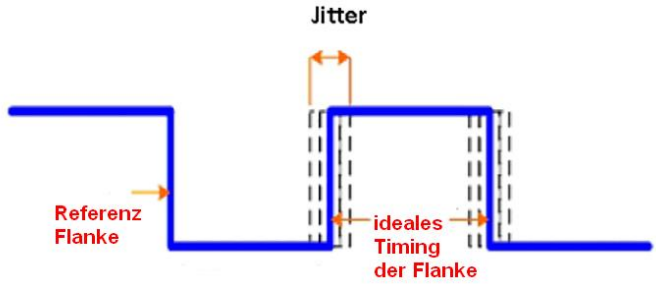


Bei zwei Signalen mit gleicher Frequenz ist eine Phasenverschiebung konstant. Bei Signalen von unterschiedlicher Frequenz variiert die Phasenverschiebung proportional zum Unterschied der Frequenzen. Bei einer PLL verwendet man die Phasendifferenz als Kriterium, um zwei Frequenzen miteinander zu vergleichen.

Obwohl es sich bei der Phasenverschiebung von periodischen Signalen im Grunde um eine zeitliche Verschiebung handelt, gibt man als Größenangabe nicht absolut eine Zeit in Sekunden an, sondern den Phasenwinkel in Grad oder Radiant als relative Größe. Eine volle Periodendauer entspricht dem Vollwinkel von 360° oder 2π, und die zeitliche Phasenverschiebung wird als Winkel $\Delta \Phi$ angegeben.

Jitter

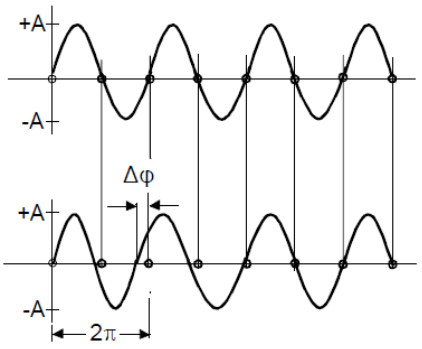
Als Jitter (engl. für ‚Fluktuation' oder ‚Schwankung') bezeichnet man das zeitliche Taktzittern bei der Übertragung von periodischen Signalen, eine leichte Genauigkeitsschwankung im Übertragungstakt. Jitter ist ein unerwünschtes Störsignal.



Auch das Signal der empfangenen Navigations-Satelliten ist durch Jitter gestört. Jitter entsteht z.B. durch zufällig auftretende Laufzeitänderungen auf dem Übertragungsweg vom Satelliten zum GPS-Empfänger. Moderne GPS-Empfängermodule nutzen Synchronisierungseinrichtungen und Algorithmen, die den Jitter minimieren.

Phasenrauschen

Jitter bei einem Oszillator bedeutet, dass die Nulldurchgänge des Oszillatorsignals kleinen statistischen Schwankungen unterliegen. Jitter äußert sich als Phasenrauschen. Phasenrauschen bedeutet, dass ein Oszillator neben der beabsichtigten einzelnen Frequenz weitere, benachbarte Spektralanteile aufweist. Je höher die Güte eines Oszillators ist, desto geringer ist sein Phasenrauschen.



Jitter bei einem Oszillator verursacht Phasenrauschen und bestimmen die Kurzzeitstabilität eines Oszillators. Mit Kurzzeitfrequenzstabilität werden diese kurzzeitigen, im Bereich von Sekundenbruchteilen bis in Minutenintervallen stattfindenden statistischen Frequenzschwankungen bezeichnet.
Phasenrauschen oder Jitter eines Empfänger-Oszillators haben einen direkten Einfluss auf das Systemverhalten des Empfangssystems. Hohes Phasenrauschen beeinflusst z.B. die Grund-Empfindlichkeit, das Signal/Rauschverhältnis, Nachbarkanal Interferenz und die Bitfehlerrate bei der Datenübertragung.

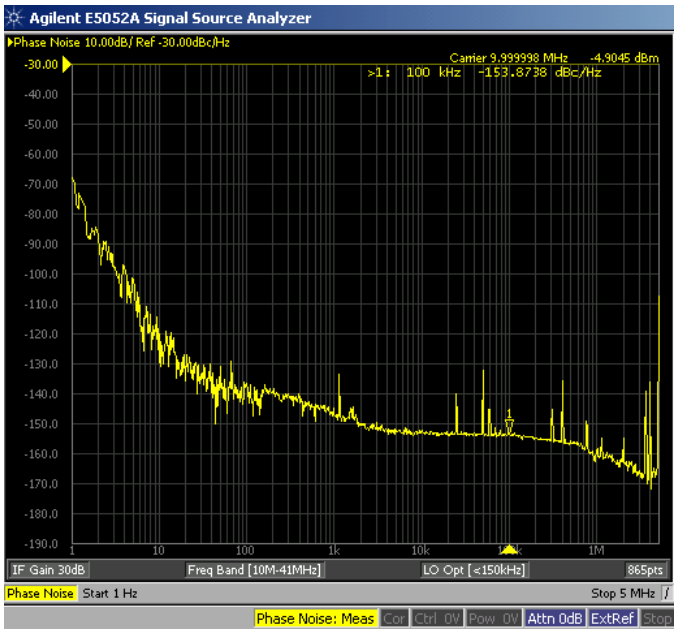


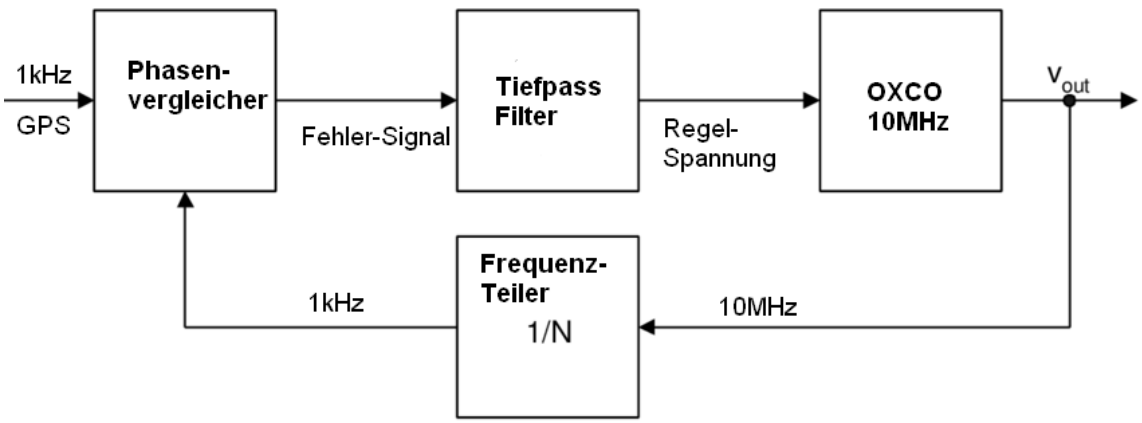
Bild: Phasenrauschen (Seitenbandrauschen) eines GPSD-Oszillators. Quelle: www.loetlabor-jena.de

PLL (Phase Locked Loop)

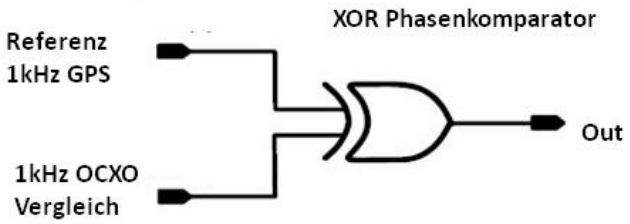
Eine Phasenregelschleife (phase-locked loop, PLL) ist ein Regelkreis, in der ein veränderlicher Oszillator (hier der OCXO) auf ein Referenzsignal (hier der GPS Timepulse) synchronisiert werden kann.

Die Phase von von Referenzsignal und Ausgangssignal werden in einem Phasenkomparator miteinander verglichen. Die Differenz wird in einem geschlossenen Regelkreis dazu benutzt, um als Regelspannung den Oszillator nachzustimmen, bis beide Frequenzen gleich und aufeinander eingelockt sind.

In der PLL unseres GPSDO ist die Referenz das 100kHz Signal aus dem GPS-Empfänger, der veränderbare Oszillator ist ein 10 MHz OCXO. Damit das 10 MHz Ausgangssignal des OCXO mit dem 100kHz Referenzsignal aus dem GPS-Empfänger im Phasenkomparator verglichen werden kann, muss es vorher mit einem Frequenzteiler um den Faktor N = 100 auch auf 100kHz heruntergeteilt werden.

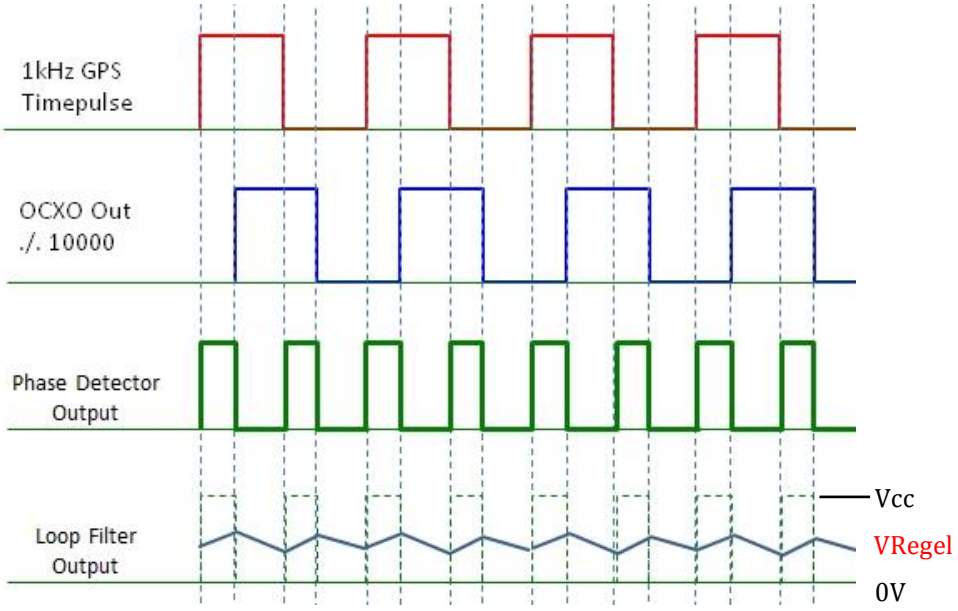


Der Phasenvergleich erfolgt in einem XOR Phasenkomparator, wie er in den bewährten PLL IC der Bauart 74HC4046 bzw. 74HC7046 [6] [7} enthalten ist. Aus dem Phasenvergleich wird eine gepulste Regelspannung zur Nachführung des OCXO gewonnen, die in einem Schleifenfilter (Tiefpass) geglättet werden muss. Im eingeschwungenen Zustand ergibt das einen geschlossener Regelkreis. Die Frequenz des Oszillators wird damit so nachführt, dass dessen Phase auf die Referenzphase des Timepulses aus dem GPS-Empfänger einrastet („Locked“). Die Ausgangsfrequenz ist mit dem hochgenauen GPS Timepulse synchronisiert.



Der Ausgang eines XOR ist „1“ wenn die Zustände am Eingang unterschiedlich sind. Er ist „1“ wenn nur an einem Eingang „1“ anliegt und am anderen „0“.

Legt man den einen Eingang des XOR das 1kHz Rechteck der GPS-Referenz und auf den anderen Eingang das auf 1kHz heruntergeteilten OCXO Ausgangssignal, entsteht am Ausgang des XOR eine 2kHz Impulsfolge, deren Impulsbreite in Abhängigkeit von der Phasendifferenz bzw. der Frequenzdifferenz variiert.

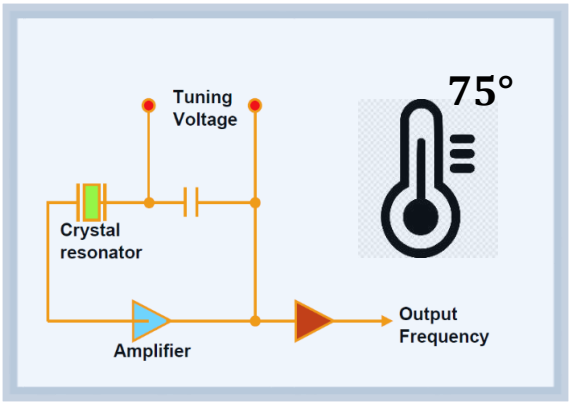


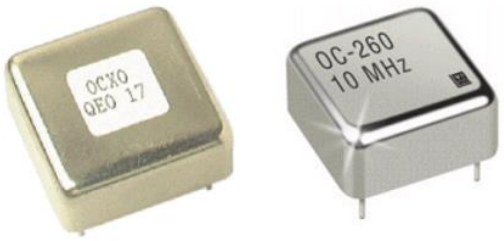
- Die Impulsbreite am Ausgang des Xor Phasenvergleichers ist proportional zur Phasendifferenz der Eingangssignale.

- Die Ausgangs-Impulse werden in einen Tiefpass (Loop Filter) geglättet. Es entsteht eine Regelspannung, die der Phasendifferenz proportional ist. Damit wird der OCXO nachgestimmt

OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator)

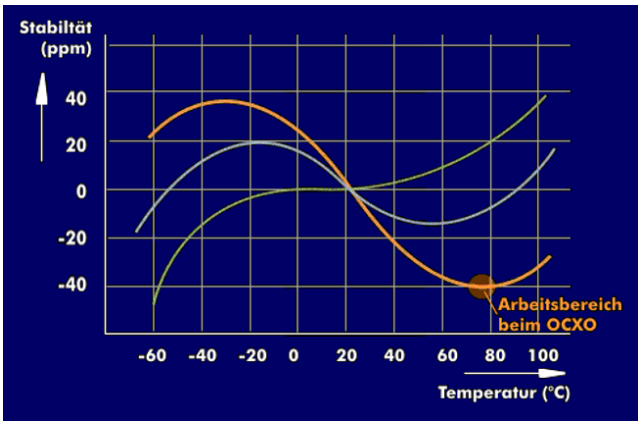
Die Frequenzstabilität von Quarzoszillatoren wird von Temperaturschwankungen beeinträchtigt. Um eine hohe Frequenz-stabilität zu gewährleisten befinden sich bei einem OCXO der Quarz und die Oszillator-Schaltkreise in einem geschlossenen, geheizten Gehäuse (Ofen), in dem eine Temperatur oberhalb der Umgebungstemperatur hochkonstant gehalten wird.





Grafik: Voltage Controlled-OCXO

Die für diese Anwendungen bestimmten Quarze haben eine Temperaturabhängigkeit, die sich nahe der Ofentemperatur umkehrt (SC-Schnitt). Diese Umkehrtemperatur liegt zwischen 70°C und 80°C. Der Quarz muss also aufgeheizt und seine Temperatur mit einem Thermostat konstant gehalten werden. Die Frequenz-Konstanz des Quarzes ist bei dieser Temperatur sehr hoch und ändert sich bei Temperaturschwankungen um diesen Punkt relativ wenig. Ofen-gesteuerte Quarzoszillatoren haben eine Aufwärm-Zeit von einigen Minuten, bevor sie ihre hohe Frequenzstabilität von bis zu $1x10^{-8}$ erreichen [7]. Nachteilig ist der hohe Stromverbrauch eines OCXO, darum sind sie für batteriebetriebene Anwendungen weniger geeignet.



Die meisten OCXO haben einen Steuereingang, über den mit Hilfe einer Abstimm-Spannung die Frequenz in einem Bereich von einigen ppm nachgezogen werden kann (VC-OCXO). Darüber ist es möglich, zur Erhöhung der Genauigkeit, der Langzeit-Frequenzstabilität und zum Ausgleich der Alterung den OCXO-mit dem hochgenauen Timepulse von GPS Satelliten nachzuführen (GPSDO).

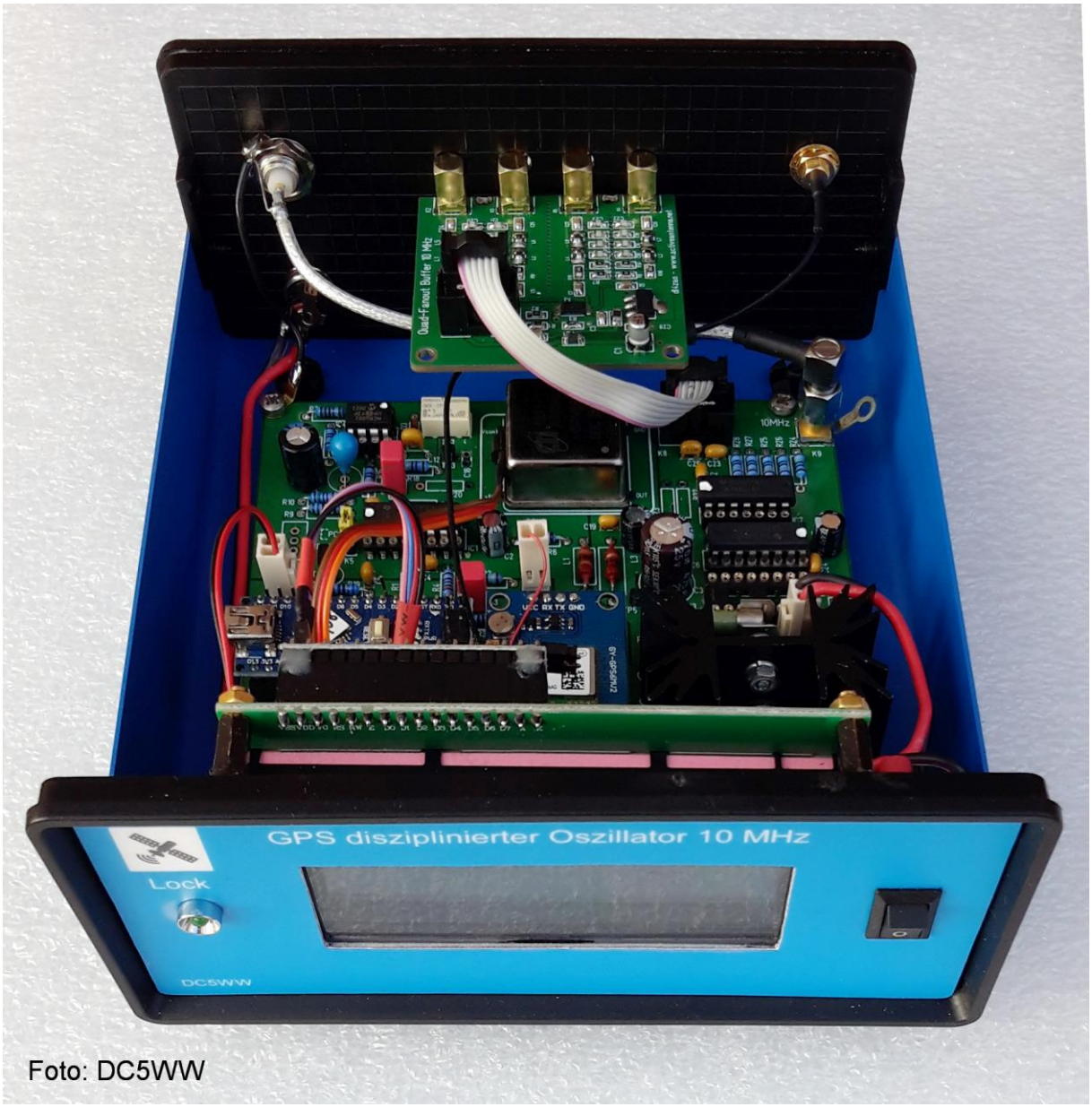


Bild: Realisierung von GPSDO und 4-fach Fan-Out Buffer von Heinz Holzberger, DC5WW. Das verwendete Gehäuse ist von Bahar, Typ Nr.. BDA 40004-A6 W170

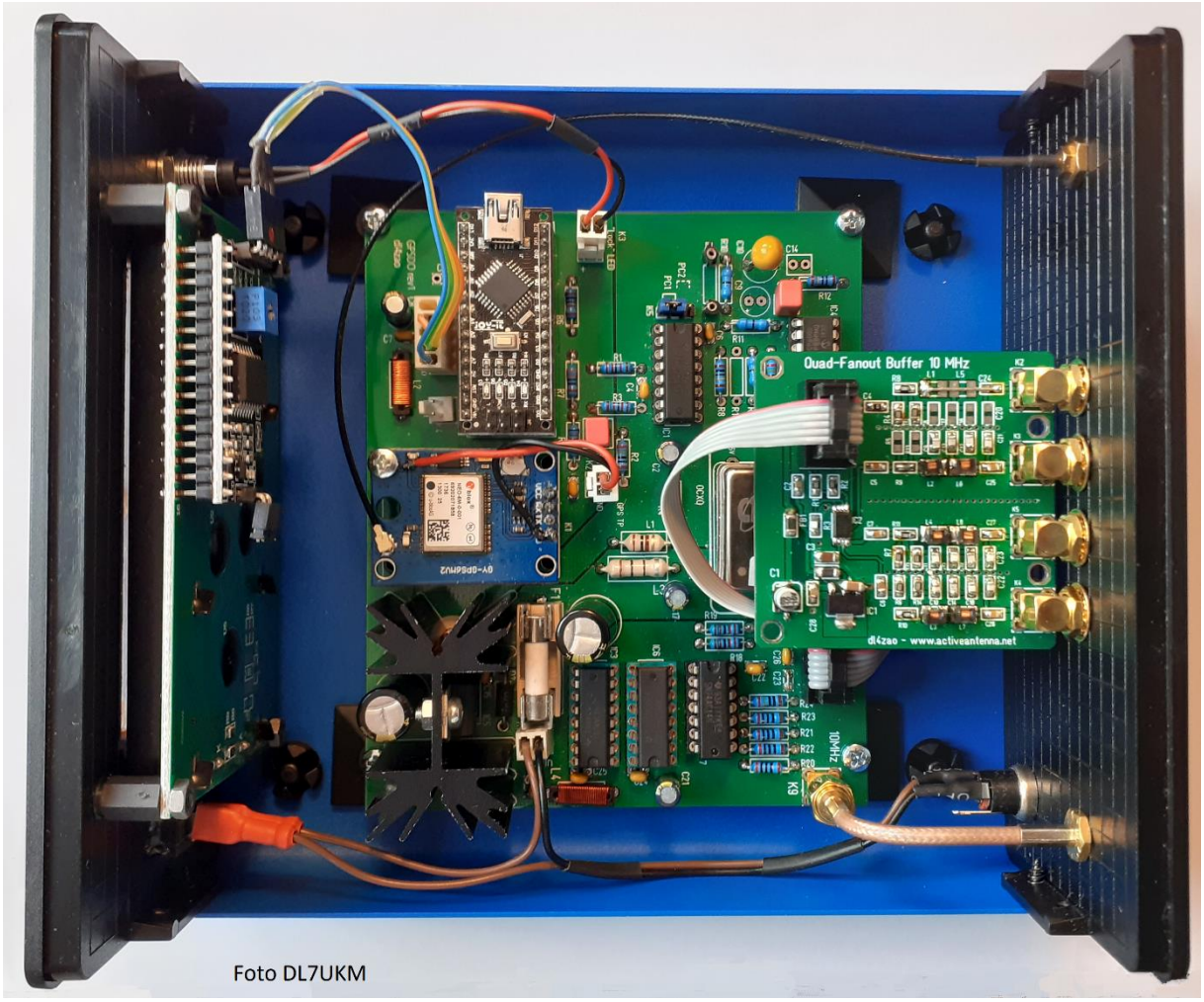


Bild: GPSDO und 4-fach Buffer von Michael Knietzsch, DL7UKM (Teiler bestückt für 1kHz Phasenvergleich)

Simple GPSDO von Christian Klosik im Gehäuse aus dem 3-D Drucker

Änderungshistorie

Leiterplatte GPSDO rev2_37

01/2021 v025 C23 durch Drahtbrücke ersetzen (DC-Ansteuerung des 4-fach Fan Out Buffers).
02/2021 v026 Tippfehlerkorrekturen

Leiterplatte GPSDO rev2.1_40 (ab 22.3.2021)

03/2021 v027 Umstellung auf Leiterplattenversion v2.1. neu: R29 (680 Ω) bessere EMV, geändert: C6 vergrößert von 1nF auf 2,2nF, neu: zusätzlicher Steckverbinder für I2C (optional), neue Leiterbahn: Rückführung der Holdover Spannung auf Arduino I/O Pin A3.

04/2021 v029 Korrektur in der Stückliste für PCB Rev 2.1_40 (C7,C8 getauscht, Rel 1 G6K-2P-Y Type)

04/2021 v30 Kleinere Korrekturen in Text und Stückliste. Zusätzlicher Text-Hinweis im Schaltbild, dass C5, C14, R20 nicht bestückt werden sollen. Möglichkeit des Anschlusses einer externen Arduino-Reset Taste (optional)

05/2021 v031 Tabelle mit Vorschlägen für die Schleifenfilterwerte bei unterschiedlichen fcomp im Dok. eingefügt
L2 geändert: vorher 10uH SMCC Drossel mit Rdc=0,5 Ohm geändert auf niederohmigen EMV-Ferrit