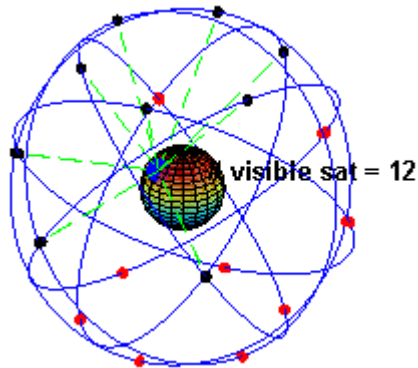


Selbstbauprojekt bauen & lernen



GPSDO

(gps – disciplined – oscillator)

Ein einfacher GPS-stablisierter 10 MHz Normalfrequenz- Oszillator fürs Shack

- Etwas Hintergrundwissen vorab
- Beschreibung des Konzepts
- praktische Erfahrungen beim Bau auf einer Leiterplatte

Michael Knietzsch, DL7UKM
Günter Fred Mandel, DL4ZAO

Ein Volks-GPSDO

Zielsetzung

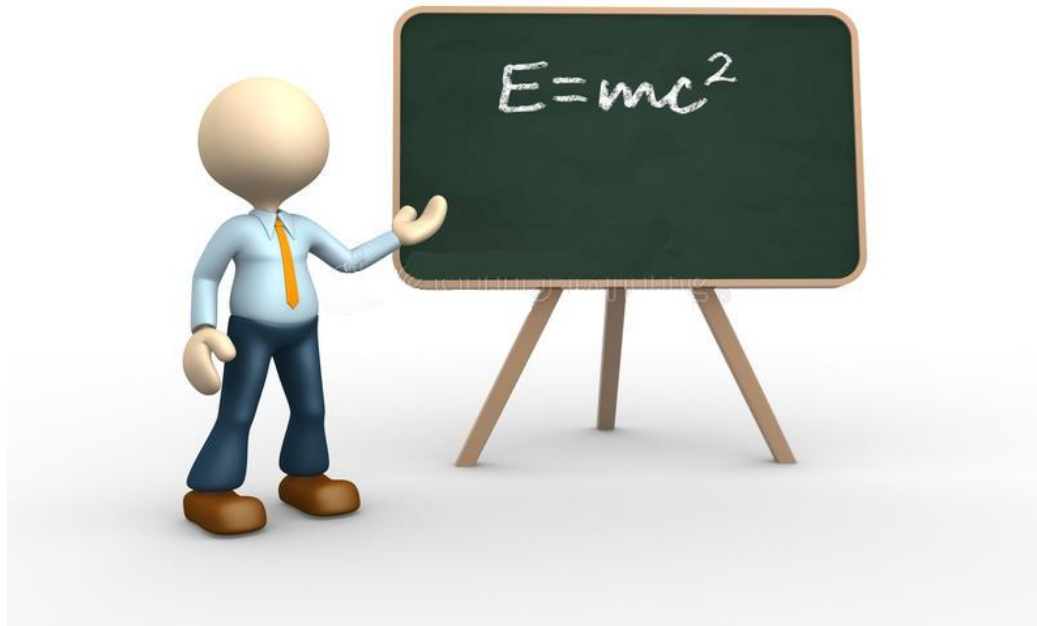
- Eine genaue und stabile 10 MHz OCXO Referenzfrequenz-Quelle fürs Shack
- „old school“ – GPS-Nachführung über eine analoge Phasenregelschleife – keine Software-PLL
- Auch für weniger Geübte nachzubauen – mit bedrahteten Bauteilen
- Verwendung gut erhältlicher Module und handelsüblicher Bauteile
- Auf doppelseitig durchkontaktierter Leiterplatte in Industriequalität
- DIY Baumappe als Doku und Nachbau-Anleitung

Kosten < 50 €

Wozu braucht man so was?

- Präzise Zeit im Shack 😊 (Abweichung von UTC von maximal einer Mikrosekunde)
- 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.
- Ansteuerung eines Kammgenerators zur Generierung eines breiten Spektrums von Harmonischen der Steuerfrequenz

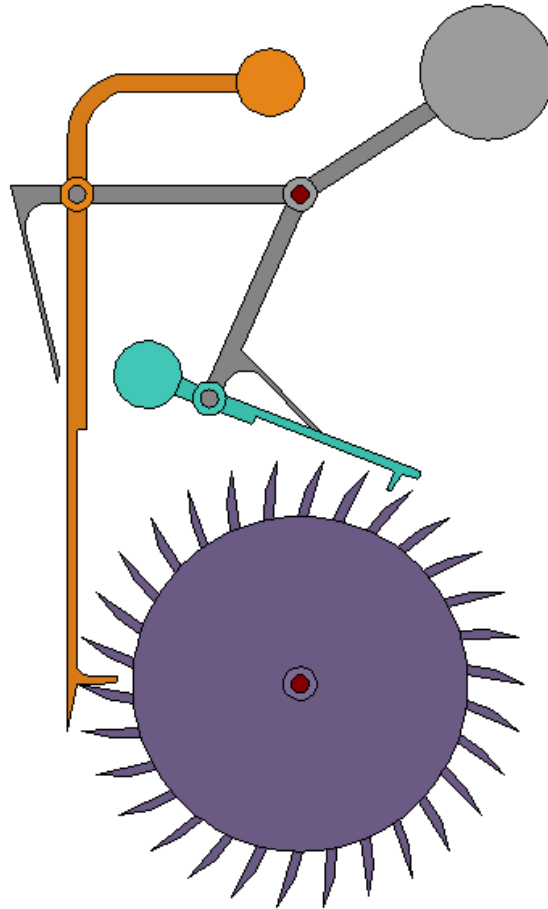
Etwas Theorie schadet nie



Wir machen uns vorab mal vertraut mit den Begriffen

Genauigkeit – Stabilität – Allan Deviation – Sigma-Tau Diagramm -
OCXO – Phasenverschiebung – Jitter – Phasenrauschen –
Kurzzeitstabilität – PLL - Regelschleife

Frequenzmessung = Zeitmessung

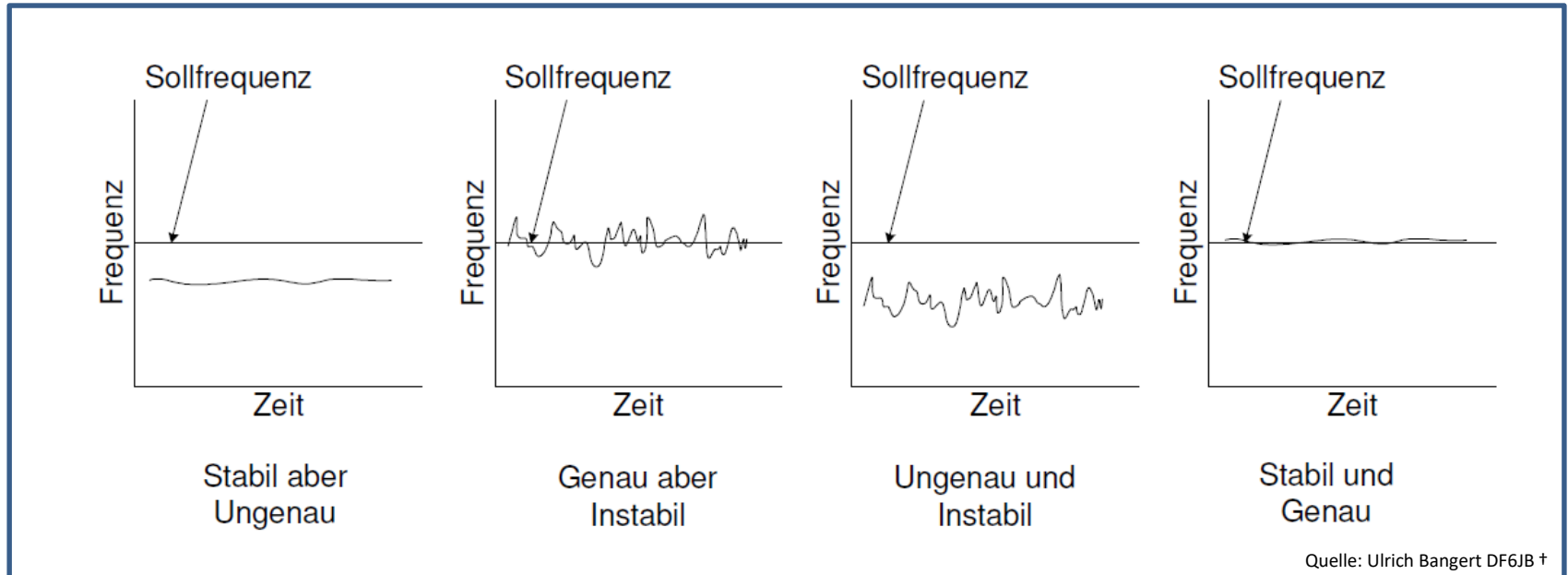


Eine kleine Geschichte der Zeit

- Harrisons H4 Chronometer anno 1761 besser $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ oder $\sim \pm 2\text{s}/\text{Monat}$
- VFO in älteren TRX $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ (0,01%) entspricht $\sim \pm 400\text{Hz}$ auf 80m
- Quarzoszillator, Synthesizer VFO $\pm 3 \cdot 10^{-5}$ (30ppm) entspricht $\sim \pm 120\text{Hz}$ auf 80m
- TCXO (temperaturkompensierter XO) $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ (2ppm) entspricht $\sim \pm 8\text{Hz}$ auf 80m
- OCXO - Frequenzaufbereitung $\pm 1 \cdot 10^{-8}$ entspricht $\sim \pm 0,04\text{Hz}$ auf 80m
oder $\pm 2000 \dots 100\text{Hz}$ auf 10GHz
- OCXO an DCF77 angebunden $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ in 200s entspricht $\pm 10\text{Hz}$ auf 10GHz
($\sim \pm 86\mu\text{s}/\text{Tag}$ oder 1s in 32 Jahren)
- OCXO an GPS angebunden $\pm 1 \cdot 10^{-11}$ in 200s entspricht $\pm 0,1\text{Hz}$ auf 10GHz
($\sim \pm 860\text{ns}/\text{Tag}$ oder 1s in 3200 Jahren)

Bezogen auf τ 1s

Genauigkeit und Stabilität sind nicht das Gleiche



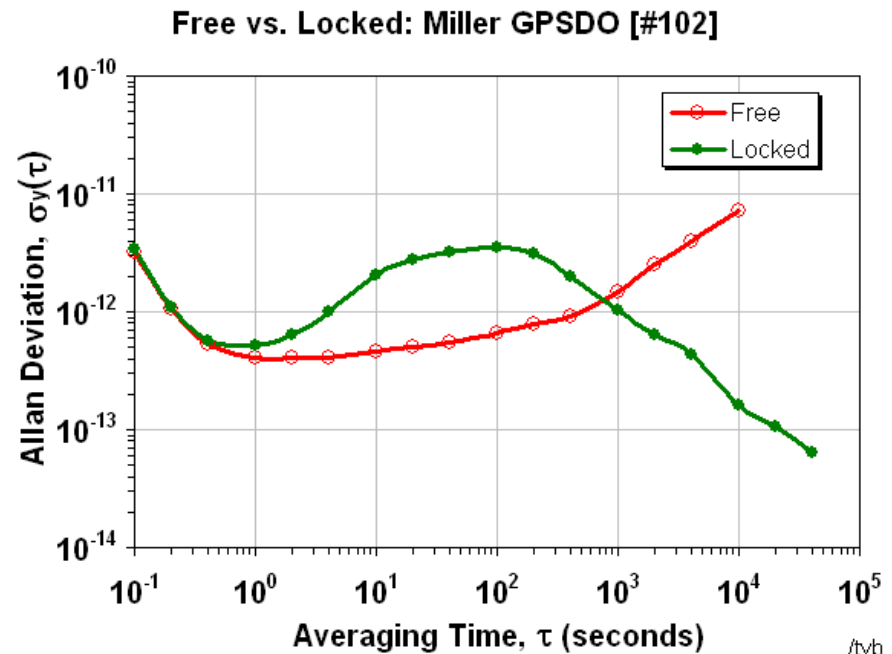
- Genauigkeit: Abweichung vom Soll-Wert der Frequenz
- Stabilität: Statistische Verteilung der Werte und Abweichungen über einen bestimmten Zeitraum. Die Angabe der Stabilität ohne die Beobachtungszeit ist wertlos.
- Als Maß für die Stabilität eines Oszillators dient die Allan Deviation

Allan Deviation - Sigma-Tau (σ - τ) Diagramm

Das nach dem Physiker David Allan benannte Maß dient zur Charakterisierung der Stabilität eines Oszillators oder einer Uhr. Sie beruht auf einer statistischen Mittelwertbildung über benachbarte Messwerte. Eine geringe Allan-Deviation ist ein Merkmal eines Oszillators mit hoher Stabilität über den gemessenen Zeitraum.

Im Sigma-Tau-Diagramm ist die Allan-Deviation σ (Sigma) eines Oszillators auf der vertikalen und die zugehörige Beobachtungszeit τ (Tau) auf der horizontalen Achse dargestellt.

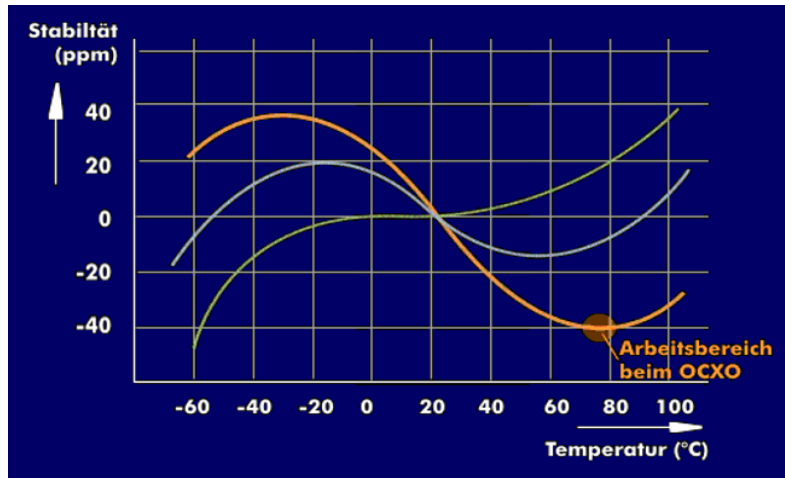
*Am Beispiel des J. Miller Simple GPSDO:
rot = OCXO freilaufend,
grün = mit GPS Anbindung.*



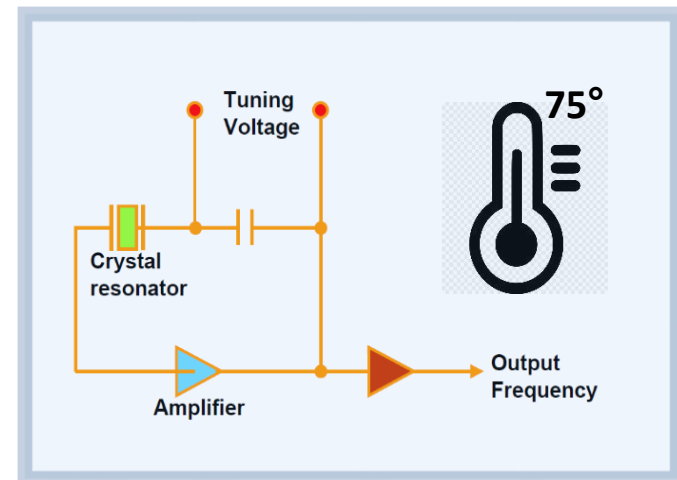
OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator)



Um eine hohe Frequenzstabilität zu gewährleisten befinden sich bei einem OCXO der Quarz und die Oszillatorschaltung in einem geschlossenen, geheizten Gehäuse (Ofen), in dem eine Betriebs-Temperatur über der Umgebungstemperatur mit einem Thermostat hochkonstant gehalten wird.



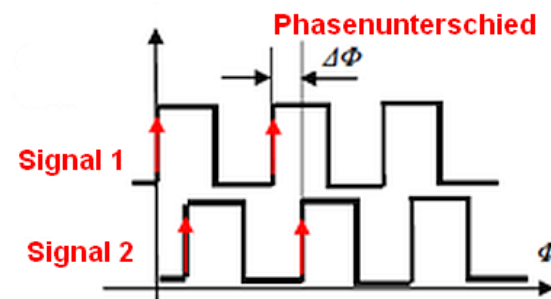
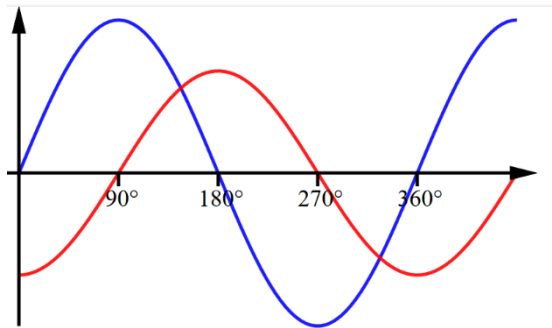
Die in einem OCXO verwendeten Quarze haben eine Temperaturabhängigkeit, die sich nahe der Ofentemperatur umkehrt. (SC-Schnitt). Diese Umkehrtemperatur liegt zwischen 70°C und 80°C.



OCXO haben einen Steuereingang, über den mit Hilfe einer Abstimm-Spannung die Frequenz in einem Bereich von einigen ppm nachgezogen werden kann.

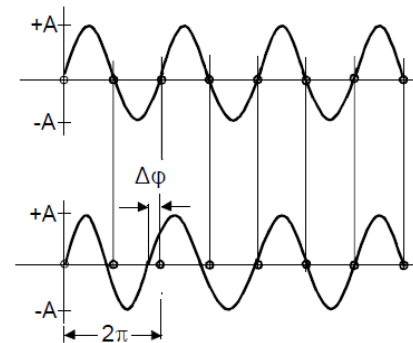
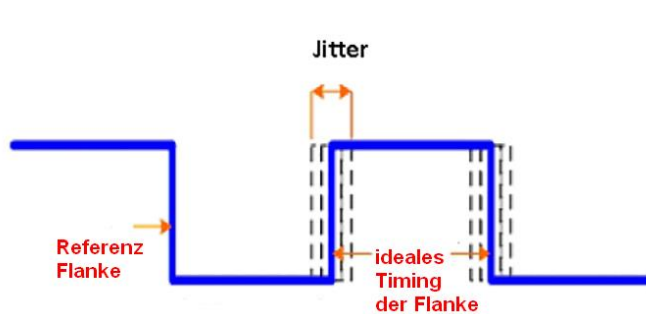
Phasenunterschied

- 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 als Vergleich für den Phasenunterschied.

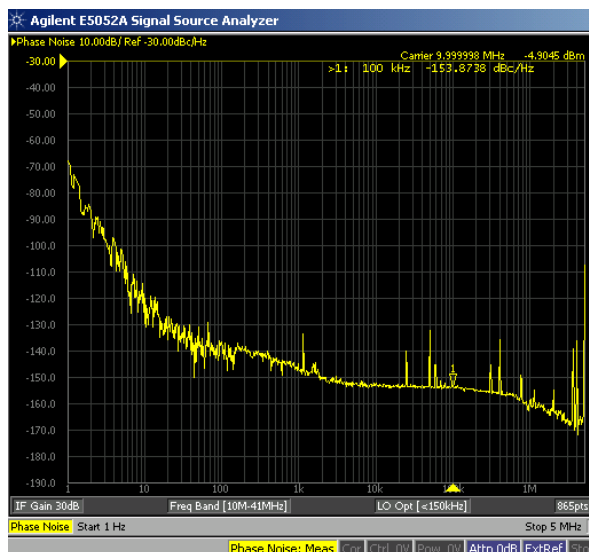


- *Bei zwei Signalen mit gleicher Frequenz ist die Phasenverschiebung konstant.*
- *Bei Signalen von unterschiedlicher Frequenz variiert die Phasenverschiebung proportional zum Unterschied der Frequenzen.*
- *Bei einer PLL verwendet man die Phasendifferenz als Kriterium, um zwei Frequenzen miteinander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

Jitter – Phasenrauschen - Kurzzeitstabilität



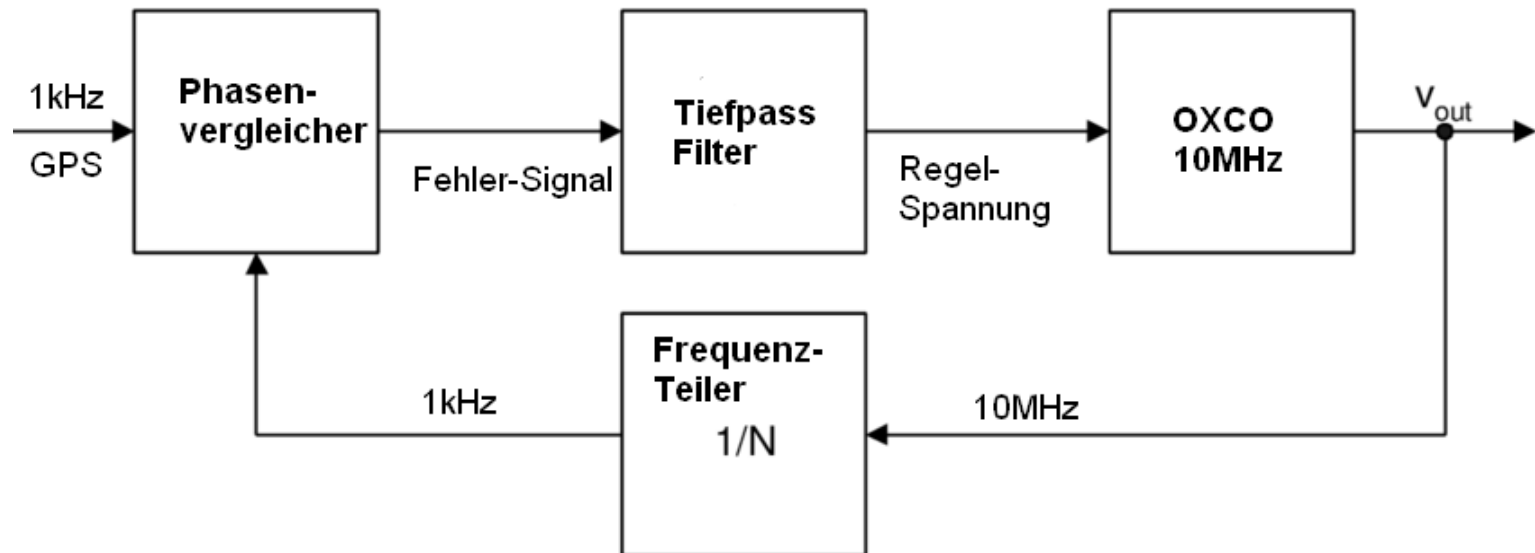
Jitter bei einem Oszillator bedeutet, dass die Nulldurchgänge des Oszillatorsignals kleinen statistischen Schwankungen unterliegen. Jitter äußert sich als Phasenrauschen. Phasenrauschen bedeutet, dass ein Oszillator neben der beabsichtigten einzelnen Frequenz weitere, benachbarte Spektralanteile aufweist.



- Als Kurzzeitfrequenzstabilität werden die kurzzeitigen, im Bereich von Sekundenbruchteilen bis in Minutenintervallen stattfindenden statistischen Frequenzabweichungen bezeichnet.
- Jitter und Phasenrauschen bilden die Kurzzeitstabilität eines Oszillators.

Bild links. Phasenrauschen (Seitenbandrauschen) eines OCO mit GPS-Anbindung
Quelle: www.loetlabor-jena.de

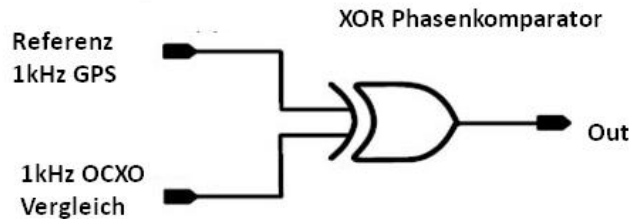
Phasenregelschleife - PLL



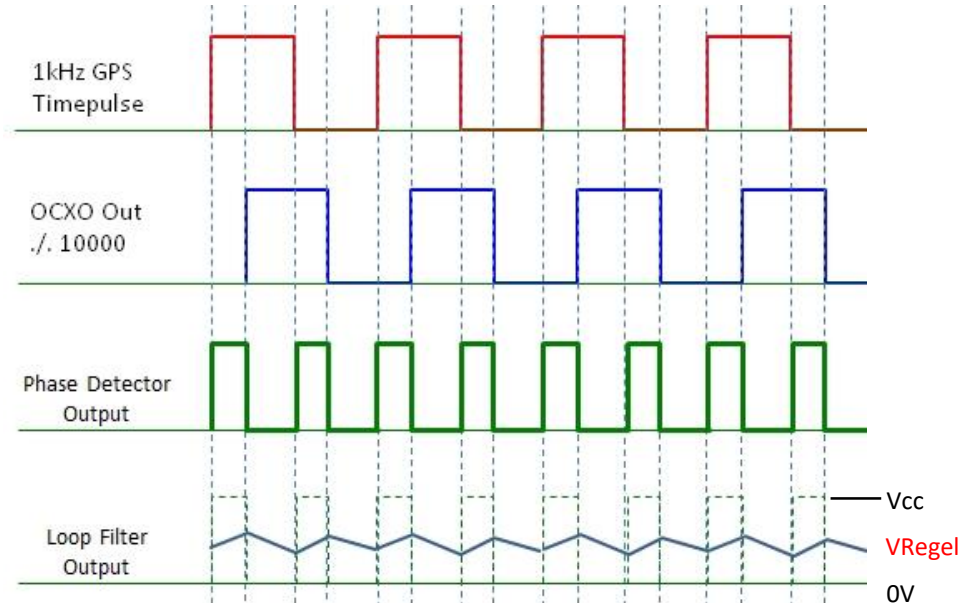
- Eine Phasenregelschleife (phase-locked loop, PLL) ist ein Regelkreis, in der ein veränderlicher Oszillator (hier der OCXO) auf ein Referenzsignal (hier der GPS Timepulse) synchronisiert werden kann.
- Die Phase von von Referenzsignal und Ausgangssignal werden in einem Phasenkomparator miteinander verglichen. Die Differenz wird in einem geschlossenen Regelkreis dazu benutzt, um als Regelspannung den Oszillator nachzustimmen, bis beide Frequenzen gleich und aufeinander eingelockt sind..

XOR Phasenvergleich

Der Ausgang eines XOR ist „1“ wenn nur an einem Eingang „1“ anliegt und am anderen „0“.
Die Eingänge müssen also unterschiedlich sein.



Die Phase des auf 1kHz heruntergeteilte OCXO Signal wird mit der Phase der 1kHz Referenz aus dem GPS Modul im XOR Phasendetektor verglichen.



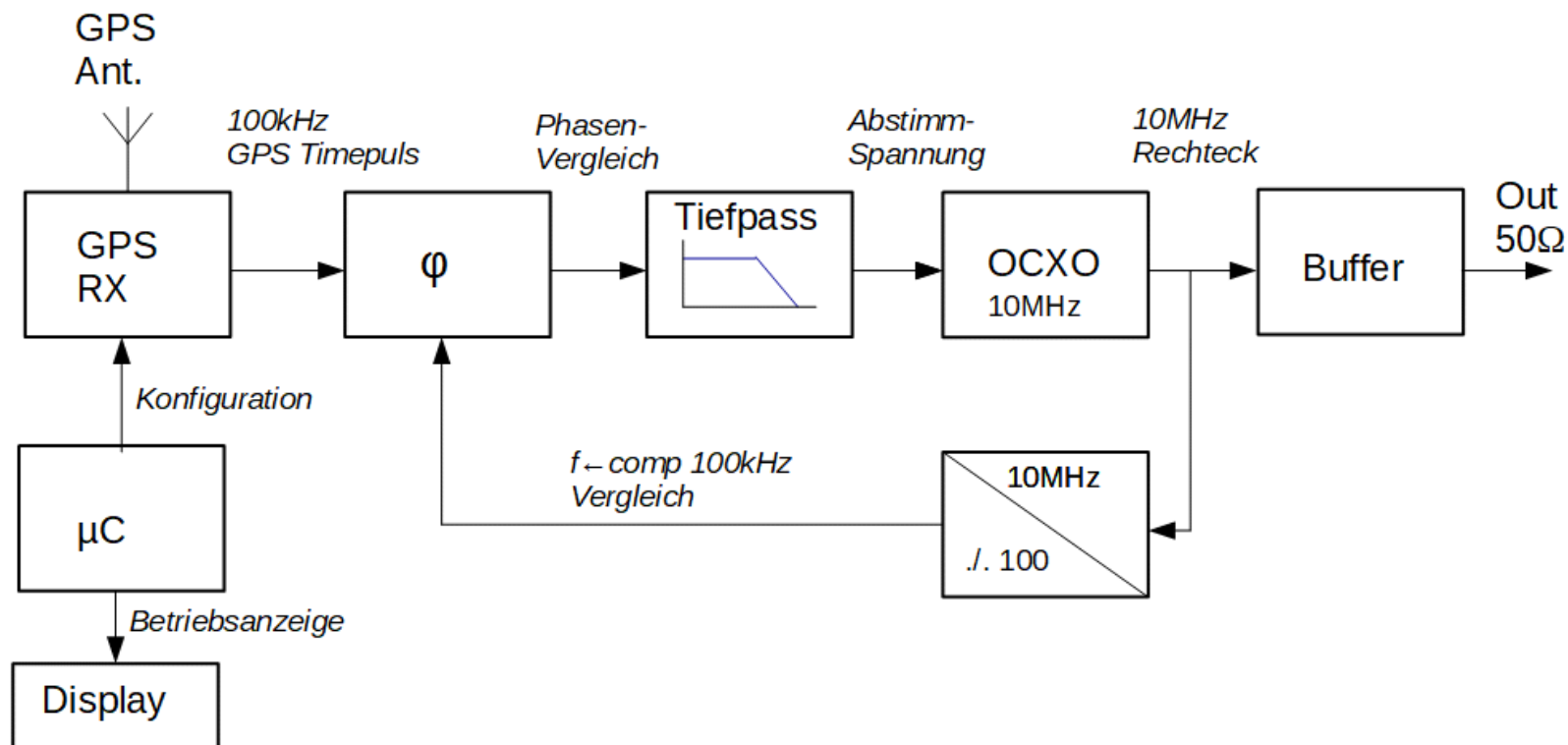
- Die Impulsbreite am Ausgang des XOR Phasenvergleichers ist proportional zur Phasendifferenz der Eingangssignale.
- Die Ausgangs-Impulse werden in einen Tiefpass (Loop Filter) geglättet. Es entsteht eine Regelspannung, die der Phasendifferenz proportional ist. Damit wird der OCXO nachgestimmt



Simple-GPSDO - das Konzept

- Der GPSDO beruht auf einem bewährten Konzept von J.R. Miller, G3RUH. Noch mit „Jupiter“ GPS Modul mit 10kHz Timepulse als PLL-Vergleichsfrequenz
- Alain, F1CJN hat das Jupiter Modul durch ein günstiges NEO-7M GPS Modul ersetzt und über einen Arduino so konfiguriert, dass es statt des „default“ 1pps (1Sek. Puls) einen 10KHz Timepulse abgibt.
- Michael, DL7UKM hat das Konzept aufgegriffen und auf einem Breadboard-Aufbau das ublox NEO-6M GPS Modul auf 1kHz Vergleichsfrequenz adaptiert. Dabei wurde festgestellt, dass das 6M Modul auch andere Frequenzen konfigurierbar ist (max 48MHz). Eine Vergleichsfrequenz von 100kHz erscheint als guter Kompromiss.
- Der Arduino Nano Mikrocontroller dient nur beim Einschalten zur Konfiguration des NEO GPS Moduls. Er kann danach die Anzeige von Betriebsparametern übernehmen.
- Die Anbindung des OCXO an den genauen GPS Zeitpuls erfolgt über eine analoge Phasenregelschleife und einen Schleifentiefpass mit tiefer Grenzfrequenz.

Blockschaltbild



qualitätsbestimmende Faktoren

- Der OCXO bestimmt die Kurzzeitstabilität (Phasenrauschen, Jitter)
- Die GPS-Anbindung sorgt für Frequenz-Genauigkeit und Langzeitstabilität (Stunden, Tage, Monate)
- Timepulse aus einem empfindlichen GPS-Empfänger mit guter Jitterkorrektur
- PLL: Richtig dimensionierter PI-Regler, Regel-Zeitkonstante >> Sekunden
- GPS-Antenne mit freier Sicht → min. 4, besser mehr Satelliten gleichzeitig
- **Ein schlechter OXCO wird mit der GPS-Anbindung nicht besser, nur die Langzeit Drift wird ausgeregelt!**

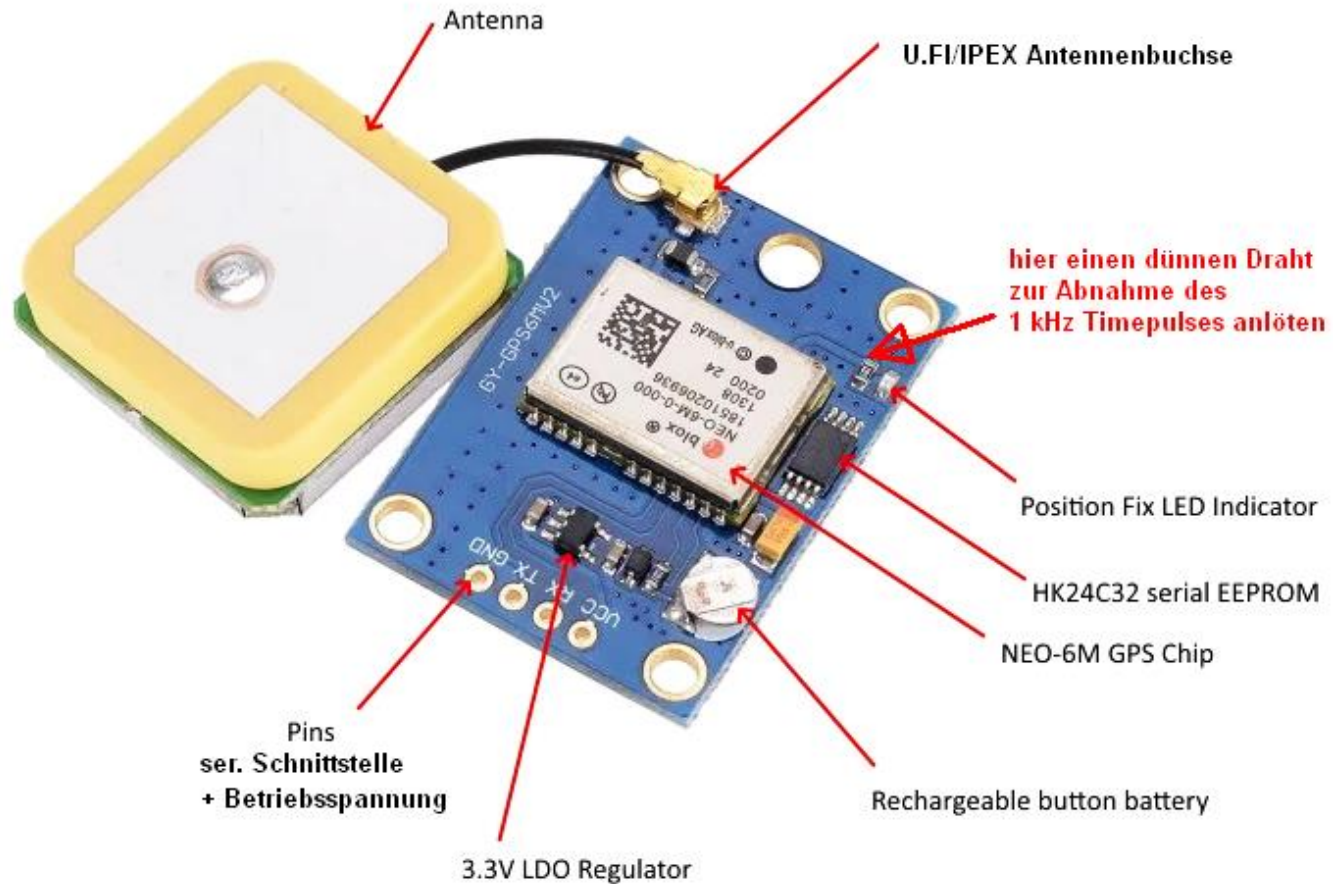
verschiedene OCXO Typen sind verwendbar



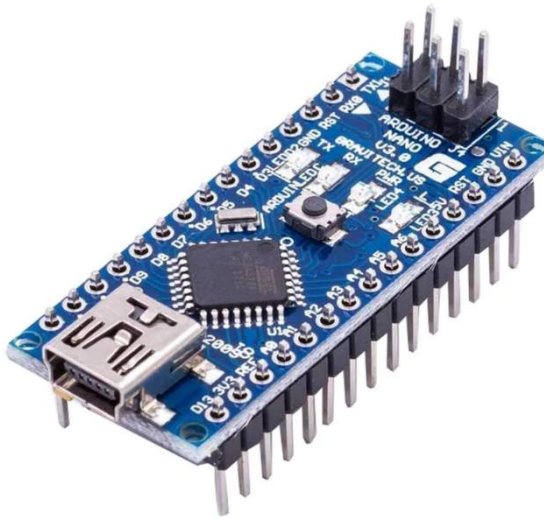
Im Internet werden gebrauchte 10MHz OCXO aus ausgemusterten GSM-Basisstationen günstig angeboten. Viele sind verwendbar und passen im Pin-Out auf die Leiterplatte.



Ublox NEO-6/7M GPS-Empfängermodul



Arduino Nano kompatibler μ -Controller

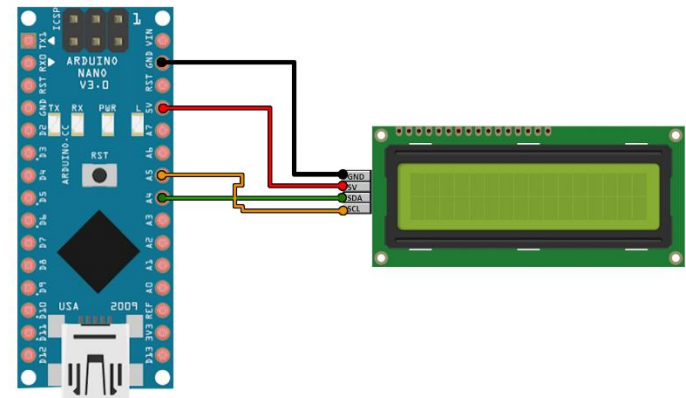


Ein Mikrocontroller-Board mit dem ATmega328 aus der Atmel-AVR-Familie auf einer Fläche von nur 1,85 x 4,3 cm². Ideal zum Aufstecken.

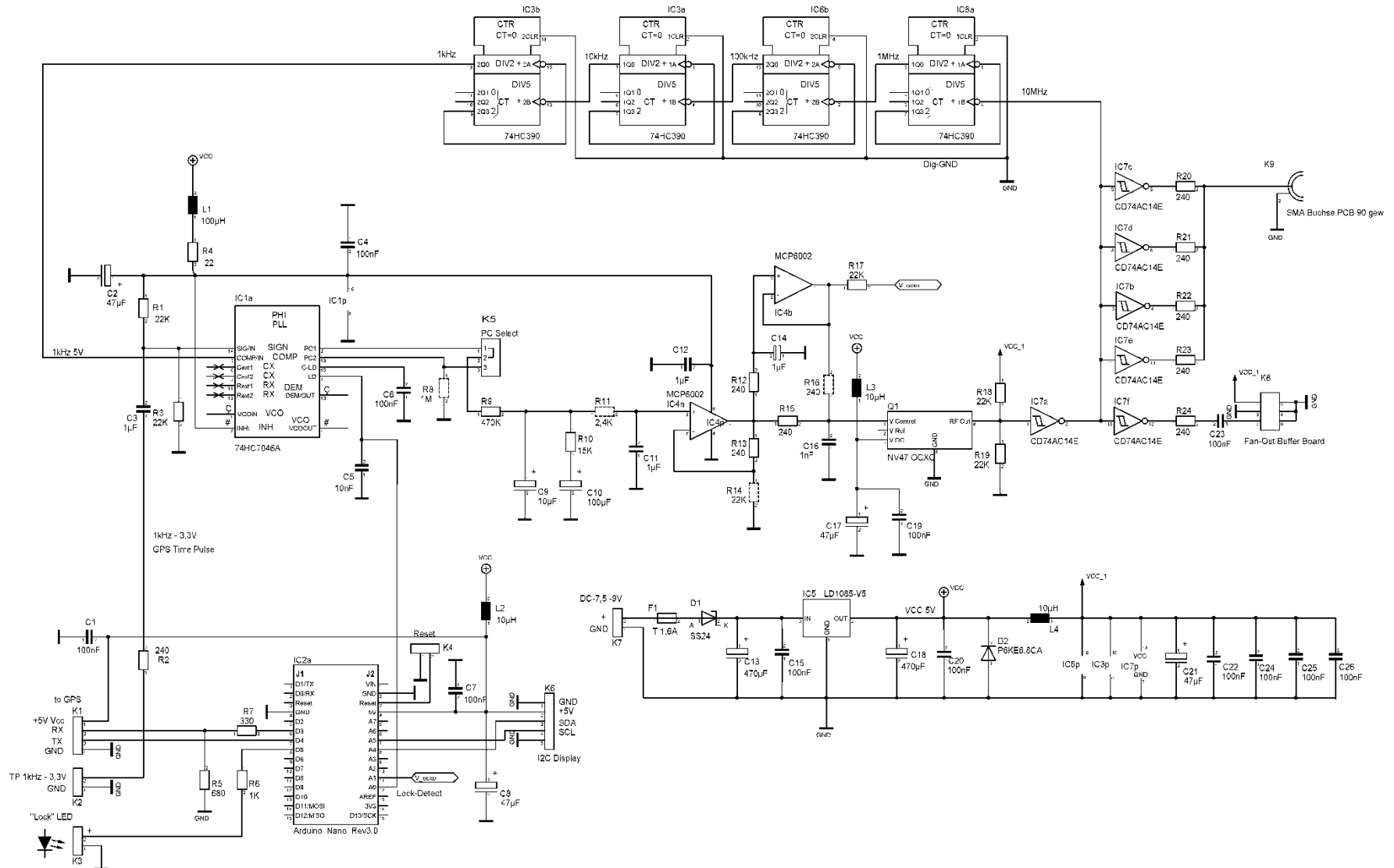
Großer Funktionsumfang bei leichter Programmierbarkeit über die freie Arduino-Entwicklungsumgebung, die auch weniger Versierten den Zugang zur Programmierung und zu Mikrocontrollern erleichtern soll.

Der Arduino übernimmt beim Simple-GPSDO beim Einschalten lediglich die Konfiguration des NEO GPS-Moduls auf die Ausgabe eines 1kHz Timepulses.

Über ein LCD-Display kann der Arduino im Betrieb weitere Aufgaben, z.B. die Anzeige von Betriebszuständen übernehmen.



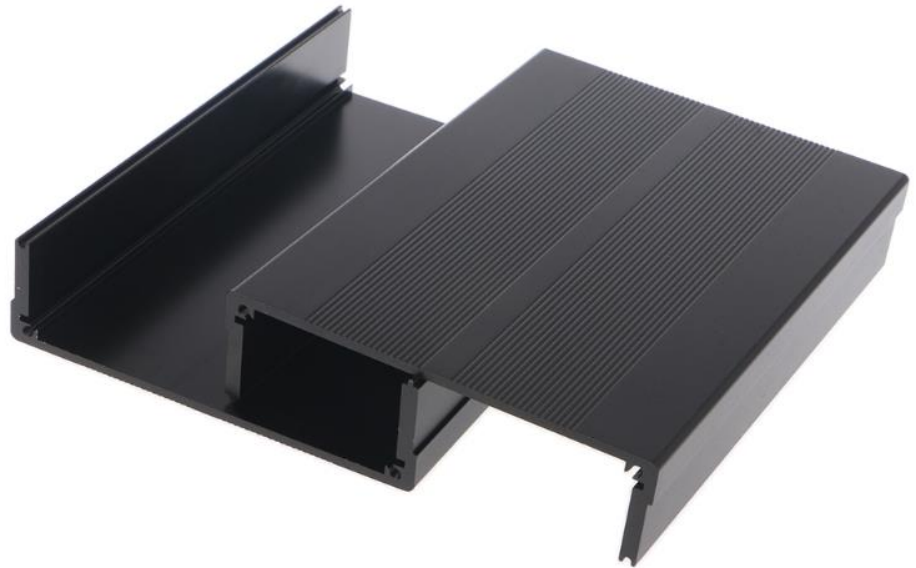
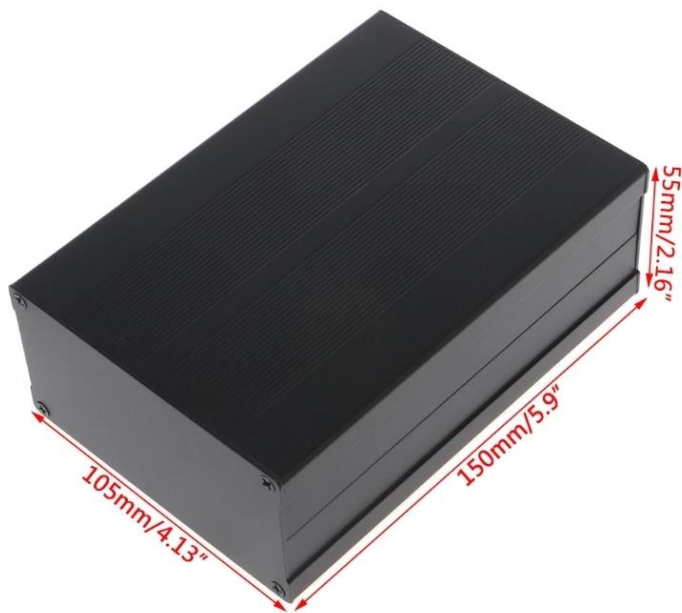
Schaltbild Rev. 1



Aufbau auf einer Leiterplatte 120 x 100 mm



Gehäusevorschlag



Alu Profilgehäuse, [über Aliexpress ca. 10 € /Stk](#)

Kostenkalkulation

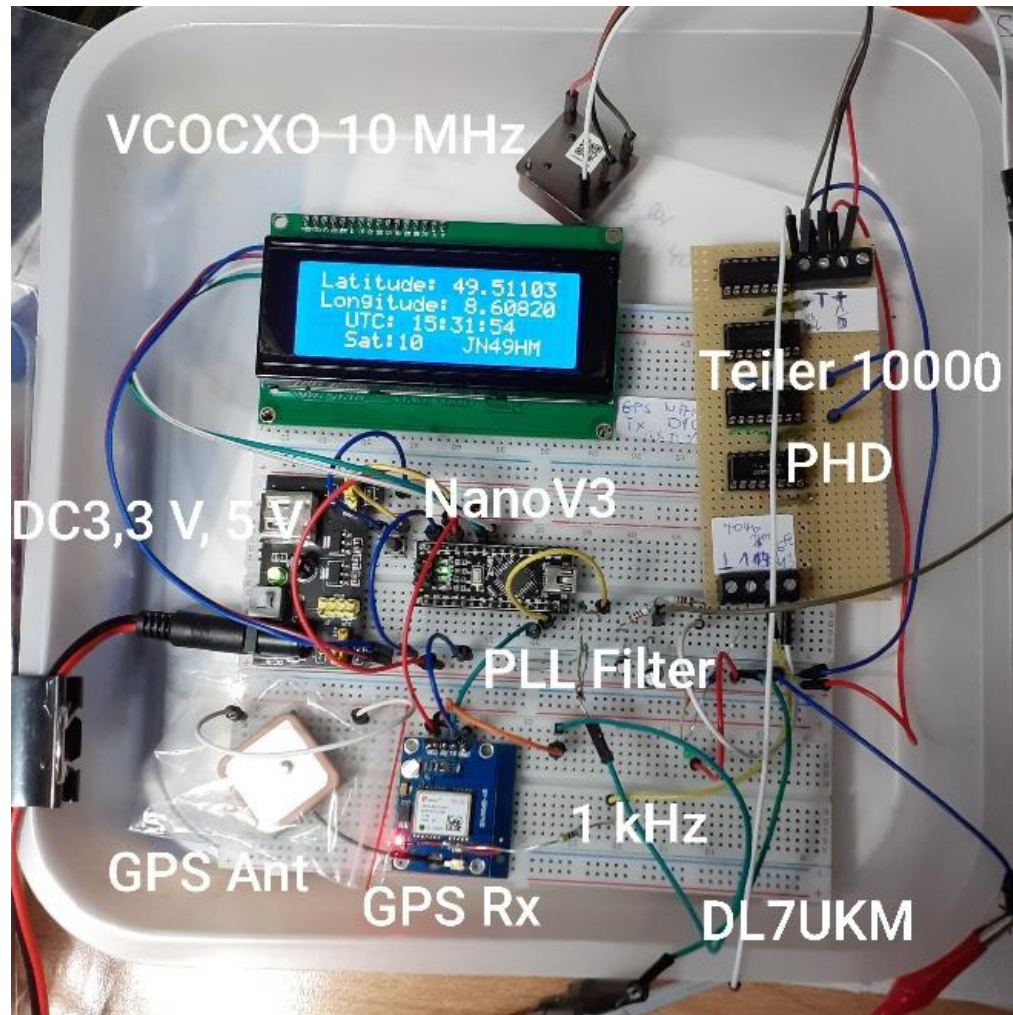
Arduino Nano kompatibler μ -Controller	5 €
10 MHz OXCO gebraucht, z.B. CTI OSC5A2B02	5 €
Leiterplatte 100 x 120mm in Industriequalität	10 €
GPS Modul ublox NEO-6M + Antenne	6 €
Diskrete Bauteile	20 €
Nach Belieben zusätzlich:	
LCD Display I2C	6 €
Externe GPS-Antenne und SMA-Pigtail	10€
Alu Profil Gehäuse, ebay	10 €

Zusammengefasst

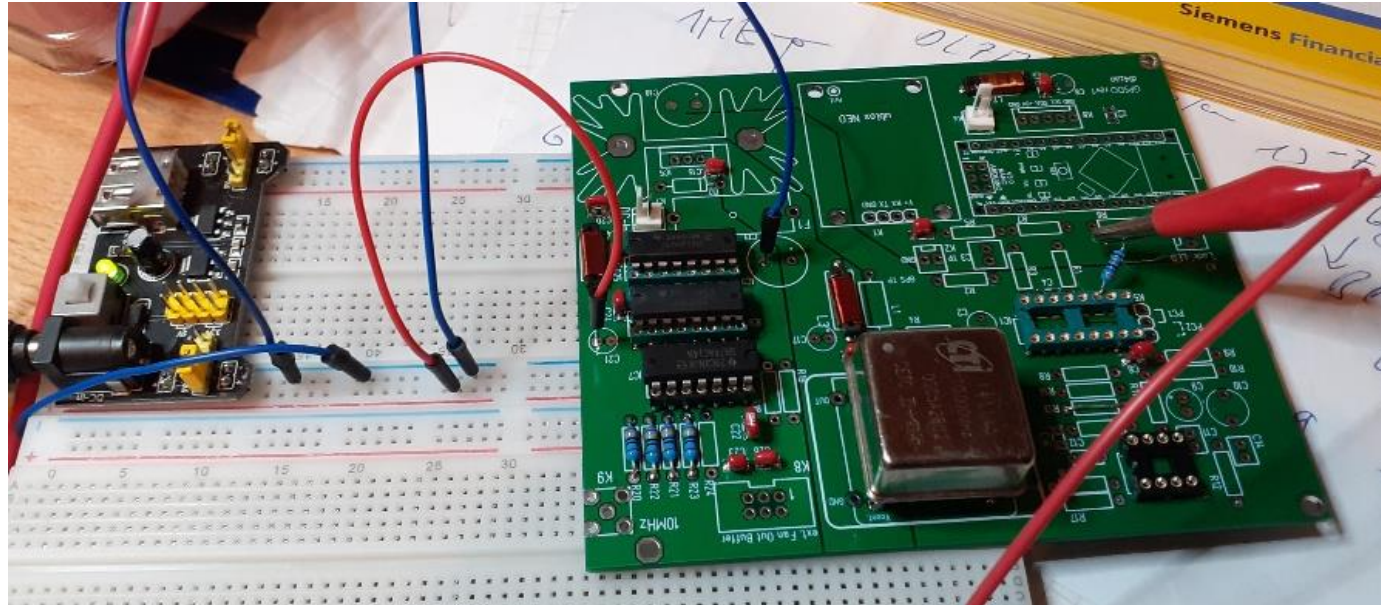
- Ein genauer und stabiler 10 MHz Referenzoszillator zum Selbstbau
- Ofenstabilisierter-Quarzoszillator (OCXO) über analoge Regelung an den hochgenauen GPS Zeitpuls angebunden
- Ausgang 10 MHz Rechteck 4,8V an 50 Ohm Last
- Erweiterbar um weitere 4 Ausgänge Sinus, +12dBm (Option)
- Versorgung: stabilisierte und gesiebte Gleichspannung, 7 bis 9V
- Stromaufnahme bis zu 1A in der Aufheizphase, typ. 400mA im Dauerbetrieb
- Leicht nachzubauen – überwiegend bedrahtete Bauelemente
- Kostenziel: ca. 50 €

Breadboard Aufbau

Der Aufbau auf dem Breadboard funktioniert einwandfrei.



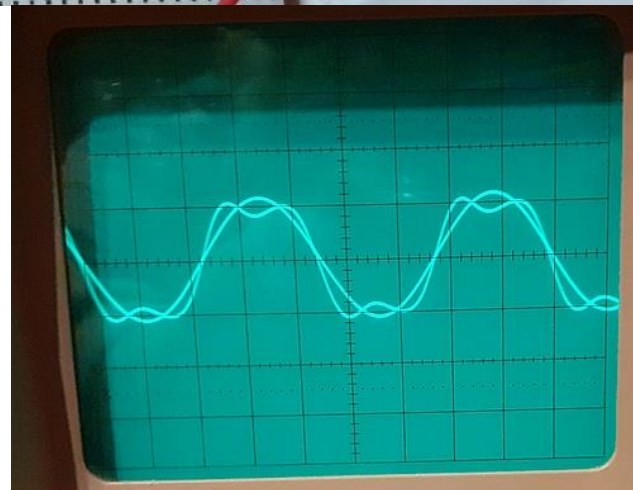
Erste Tests des Prototyps Rev. 1 auf der Leiterplatte



Oben:
Erste Bestückungs-Schritte auf der
Leiterplatte

Rechts:
Phasenvergleich mit einem Vergleichs-
GPSDO. Phase steht still.

Bilder: DL7UKM

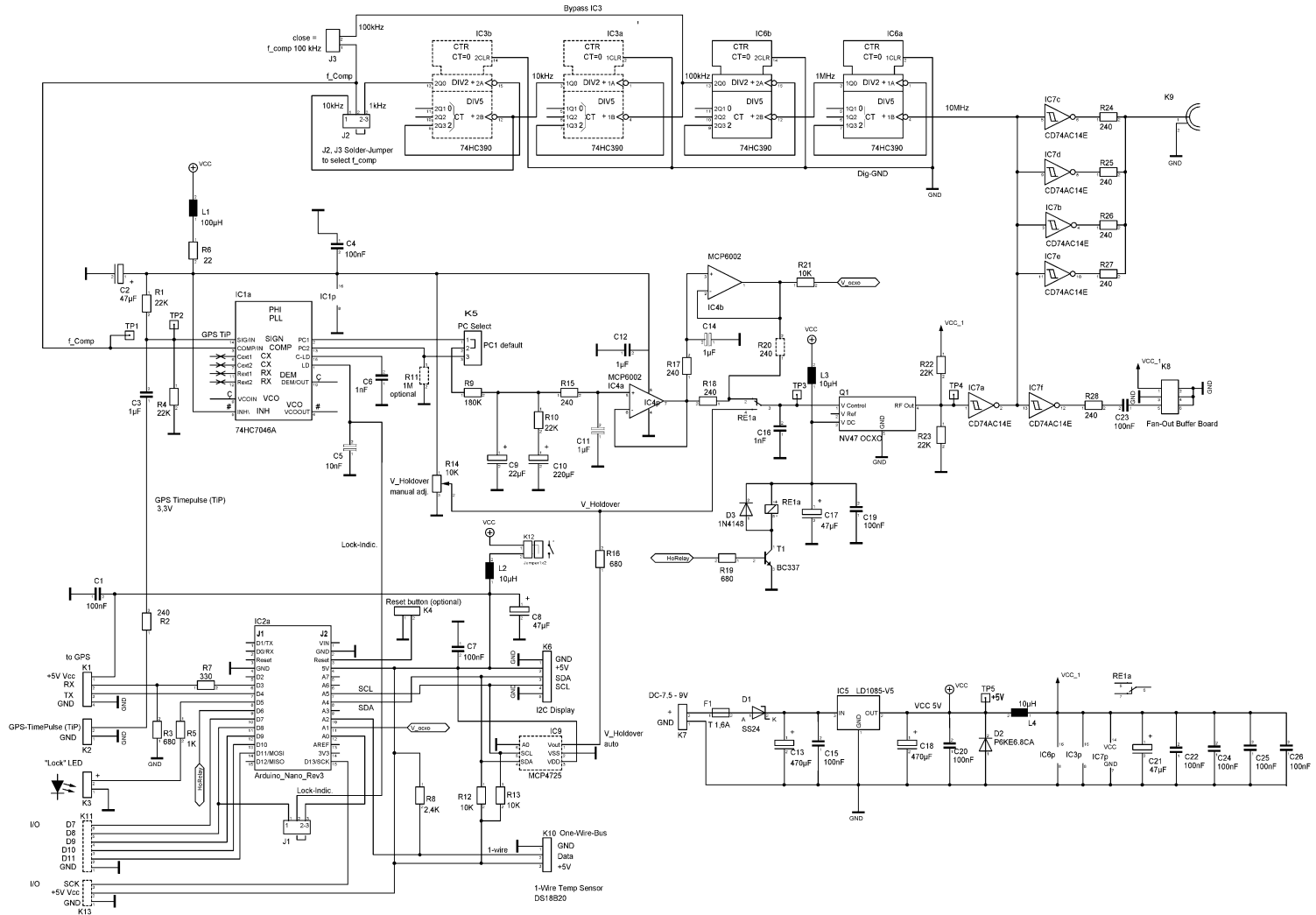


Rev. 2 mit sinnvollen Erweiterungen

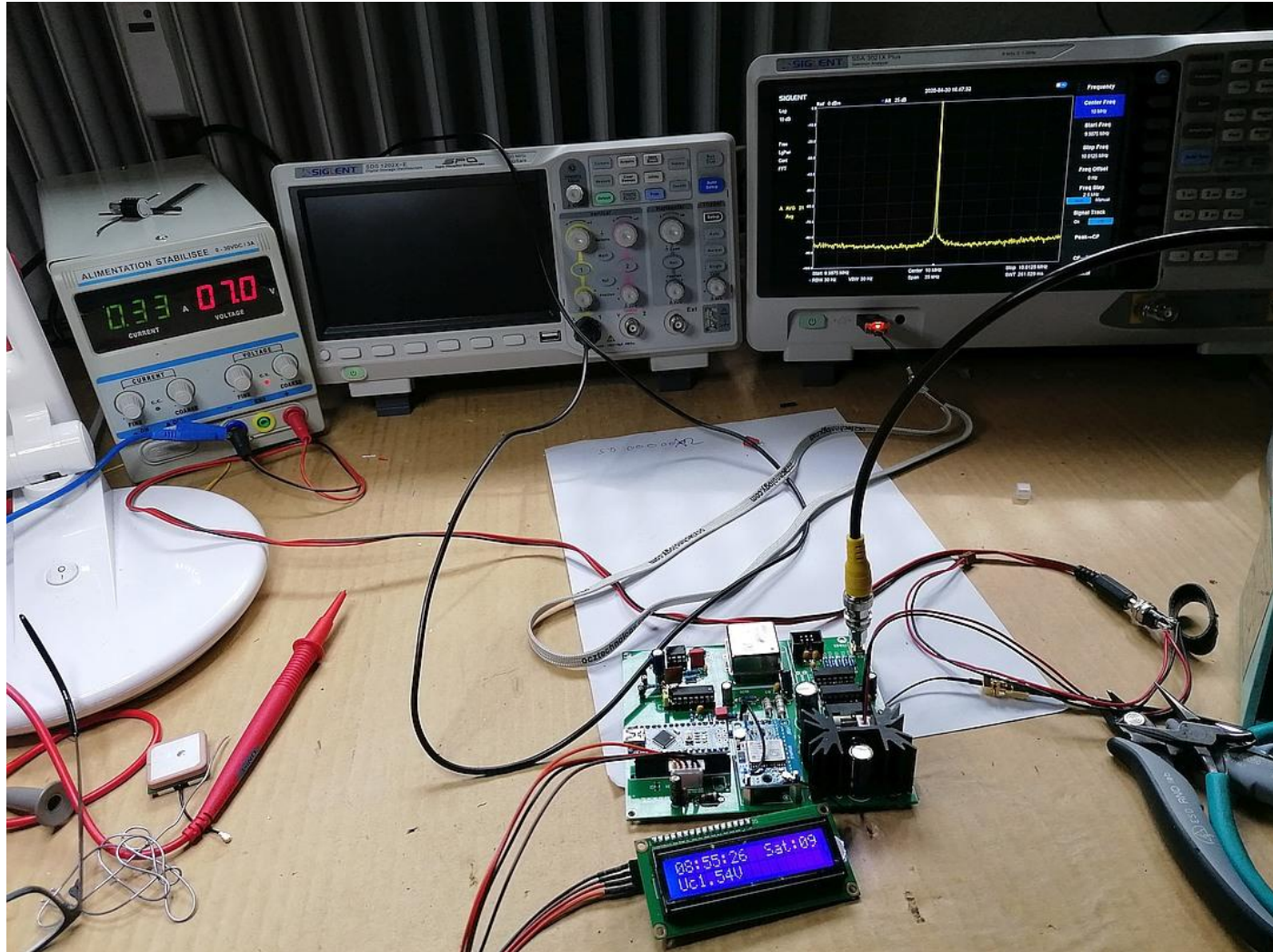
Nachdem sich die „Nullserie“ als nachbausicher und stabil bewährt hat, gab es bald Bedarf für eine zweite Bauserie mit sinnvollen H/W und S/W Erweiterungen:

- Vergleichs-Frequenz / Zeitpuls wählbar: 1 kHz – 10 kHz – 100 kHz - 1MHz
- Anzeige von Abstimmungsspannung, OCXO-Temperatur, Lock-Zustand
- „Holdover Funktion“ manuell und automatisch. Ohne GPS Anbindung wird die OCXO Abstimmungsspannung auf den letztgültigen Wert mit GPS Sync. eingestellt.
- Zusätzliche I/O Anschlüsse, I2C und One-Wire für individuelle Erweiterungen.
- Erweiterungsplatine: Quad-Fanout Buffer mit 4 gefilterten Sinusausgängen
- Adapterplatine für die Nutzung von günstigen SMD-VC-TCXO an Stelle eines OCXO. Andere Ausgangsfrequenzen, wie z.B. Für 25MHz oder 40MHz TCXO

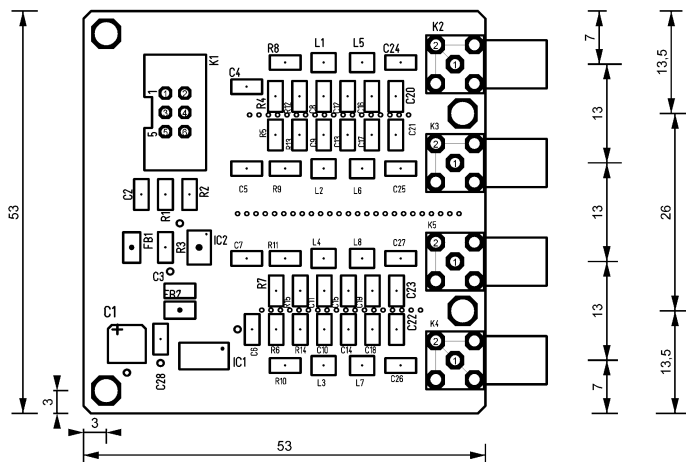
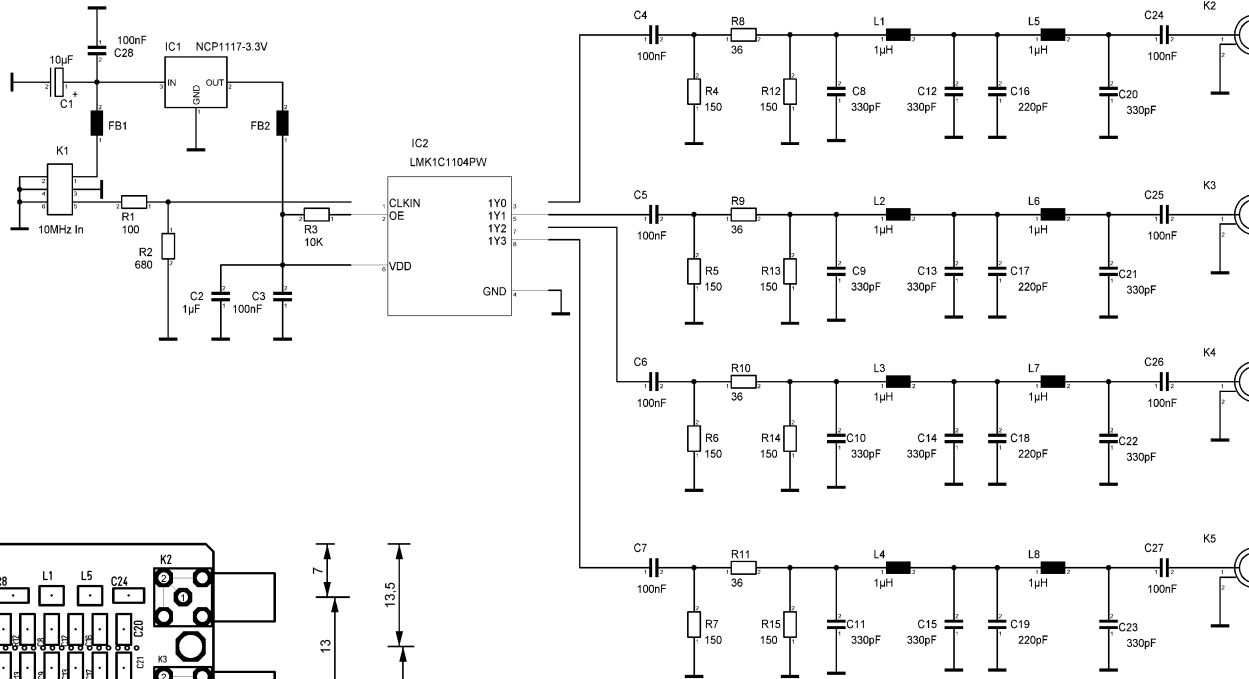
Schaltbild Rev. 2 mit 100kHz Phasenvergleich



Leiterplatte Rev. 2 beim Testen



Quad Fan-Out-Buffer mit 4 Sinusausgängen

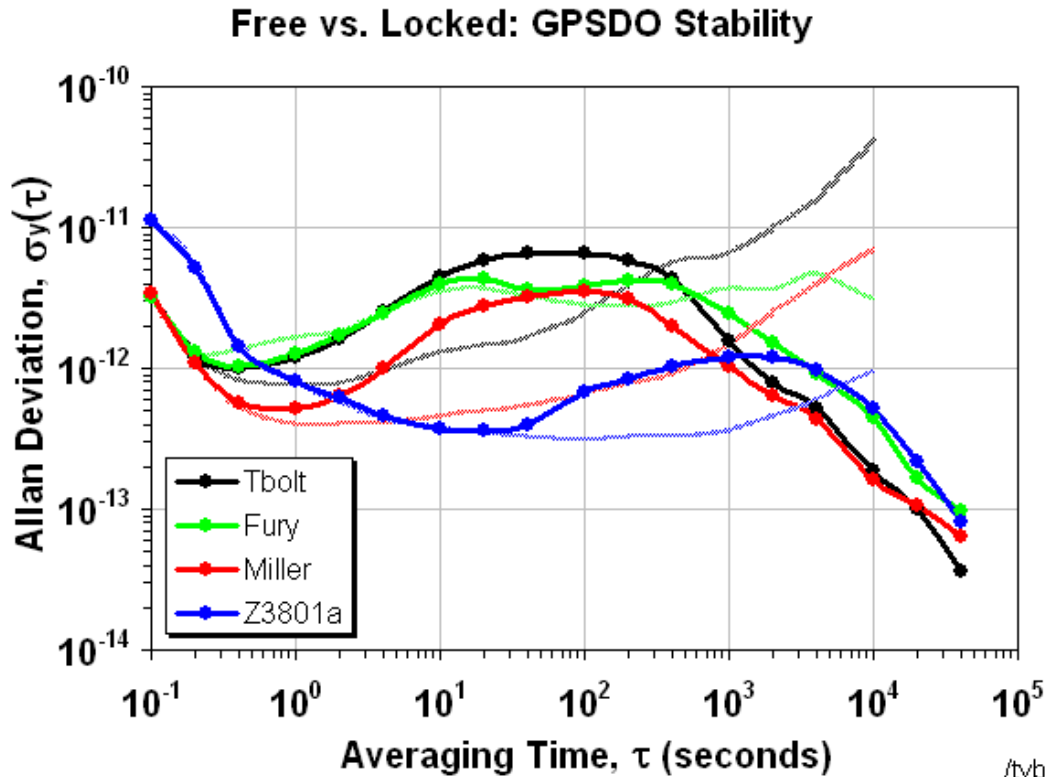


Diesmal doch mit SMD Bauelementen

Referenzen und weiterführende Information

- [1] Ulrich Bangert DF6JB † [„Über die Stabilität von Oszillatoren und Frequenznormalen“](#)
- [2] J.R. Milller, G3RUH [“GPS Stabilised 10 MHz Oscillator“](#)
- [3] Alain Fort, F1CJN [“NEO-7M with Arduino to replace the 10 KHz from GPS Rockwell Jupiter“](#)
- [4] ublox NEO GPS Module: <https://www.u-blox.com/en/product/neo-6-series?lang=de>
- [5] Datenblatt: [CD74HC7046A, CD74HCT7046A, Phase-Locked Loop with VCO and Lock Detector](#)
- [6] NXP Applikationsschrift:
[CMOS Phase-Locked-Loop Applications Using the HCT4046A and CD54/74HC/HCT7046A](#)
- [7] IEEE, Tutorial [„Precision Frequency Generation Utilizing OCXO and Rubidium Standard“](#)
- [8] Bliley Guide to OCXO : <https://blog.bliley.com/choosing-best-quartz-crystal-oscillator>
- [9] Jörg Logemann, DL2NI: [„GPS disziplinierter Normalfrequenzoszillator“](#)
- [10] David W. Allan, N. Ashby, C.C. Hodge: [„The Science of Timekeeping“, HP Application Note 1289](#)
- [11] Bernd Neubig, DK1AG: [Das große Quarzkochbuch, Kapitel 7 “Kurzzeitstabilität“](#)

Anhang



Allan Deviation Vergleich diverser Frequenznormale

Miller, G3RUH, Simple GPSDO

HP Z3101A Frequenznormal

Jackson Labs Fury GPSDO

Trimble Thunderbolt GPSDO

Volle Farbkurve = GPS Locked

Schattierte Kurven = Freilaufend

Anhang

Vergleich von TCXO, OCXO und Rubidium

Genauigkeit verschiedener Oszillatoren			
Funktion:	TCXO	OCXO	Rubidium
Kurzzeitstabilität ($\tau = 1$ sec)	$\pm 5 \cdot 10^{-9}$	$\pm 2 \cdot 10^{-10}$	$\pm 2 \cdot 10^{-12}$
Genauigkeit des PPS (Sekundenimpuls)	$< \pm 250$ nsec	$< \pm 100$ nsec	$< \pm 100$ nsec
Phasenrauschen	N/A	1Hz -75dBc/Hz 10Hz -110dBc/Hz 100Hz -130dBc/Hz 1kHz -140dBc/Hz	1Hz -75dBc/Hz 10Hz -89dBc/Hz 100Hz -128dBc/Hz 1kHz -140dBc/Hz
Genauigkeit freilaufend, ein Tag	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$ ± 1 Hz (Note1)	$\pm 1.5 \cdot 10^{-9}$ ± 15 mHz (Note1)	$\pm 2 \cdot 10^{-11}$ ± 0.2 mHz (Note1)
Genauigkeit freilaufend, ein Jahr	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$ ± 10 Hz (Note1)	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$ ± 1 Hz (Note1)	$\pm 5 \cdot 10^{-10}$ ± 5 mHz (Note1)
Genauigkeit mit GPS synchron, 24 Stunden gemittelt	$\pm 5 \cdot 10^{-11}$	$\pm 5 \cdot 10^{-12}$	$\pm 1 \cdot 10^{-12}$
Genauigkeit der Zeit freilaufend, ein Tag	± 8.6 msec	± 130 μ sec	± 1.8 μ sec
Genauigkeit der Zeit freilaufend, ein Jahr	± 32 sec	± 3.5 sec	± 16 msec
Temperaturdrift freilaufend	$\pm 2.5 \cdot 10^{-6}$ (-10...70°C)	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ (-20...70°C)	$\pm 6 \cdot 10^{-10}$ (-25...70°C)
Note 1: Die Genauigkeit in Hertz basiert auf der Normalfrequenz von 10MHz. Zum Beispiel: Genauigkeit des TCXO (freilaufend, ein Tag) ist $\pm 1 \cdot 10^{-7} \cdot 10\text{MHz} = \pm 1$ HZ			
Die angegebenen Werte für die Zeit und Frequenzgenauigkeit (nicht Kurzzeitstabilität) sind nur für eine konstante Umgebungstemperatur gültig !			