

DJ5FN

**Normalfrequenz
(frequency standard)**

**Heinz Schmiedel
DJ5FN**

Übersicht

- Wozu genaue Frequenz?
- Kurz- und Langzeitstabilität
- Quarzoszillatoren
- Atomnormale
- DCF77-Frequenznormal
- GPS-Frequenznormal
- Rundfunk-, TV-, DVBT-Normalfrequenz
- Zusammenfassung

Motivation

- Experimentelle Beschäftigung mit
 - Quarzoszillatoren, XSD, HP10544, ...
 - Rubidiumstandard XSRB
 - DCF77 und GPS
- Rasche Kontrolle der Frequenzgenauigkeit mit Spektrumanalysator und TV-Sendern (analog und DVBT)

Wozu genaue Frequenz?

- Auffinden des Funkpartners bei schwierigen Funkbedingungen, z.B. EME
- 1kHz bei 10GHz entspricht einer Abweichung $\Delta f/f$ von 0,0000001 (10^{-7})
- Normalfrequenzen (typisch):
 - 10MHz (die Standard Referenz-Frequenz)
 - 5MHz (früher)
 - Trend zu höheren Frequenzen, z.B. 100MHz
- Freischwingende Oszillatoren schaffen $<10^{-3}$ (Spezifikation der Luftwaffe für Flugfunkgeräte im 2. Weltkrieg, z.B. FuG10 EK [Trenkle])

Freischwinger Oszillator, LC



FuG10 EK



- Äußerst stabiler Aufbau
- Temperaturkompensation (Keramik-C)

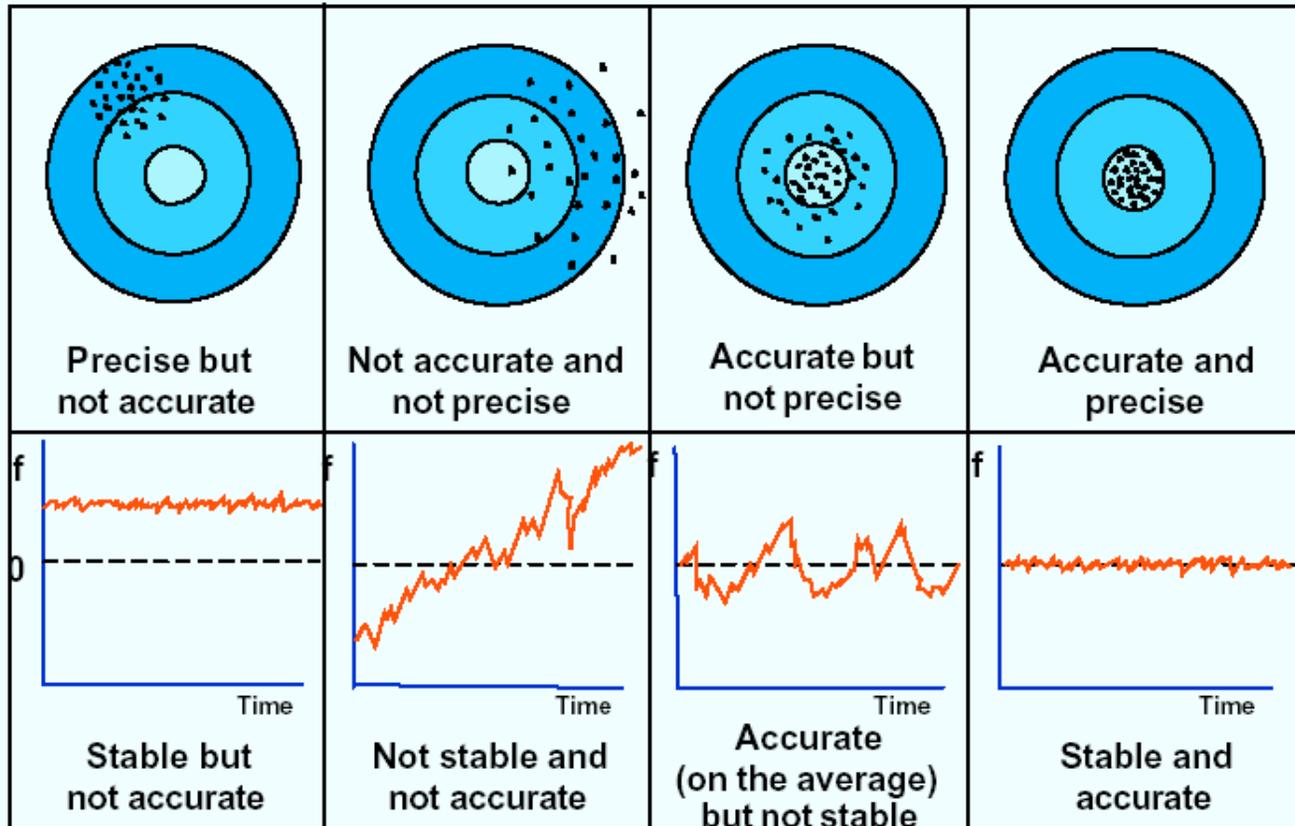
- Spezifikation der Luftwaffe (1938): $\pm 1,3\text{kHz}$ bei $4,5\text{MHz}$ und $\pm 50^\circ\text{C}$!, z.B. FuG10 EK [Trenkle]

Kurzzeit- und Langzeitstabilität

- Kurzzeitstabilität:
 - Phasenrauschen
 - Güte des Oszillatorschwingkreises
 - Synthesizer, PLL
- Langzeitstabilität:
 - Oszillatordrift
 - Temperatur
 - Alterung der Bauelemente

Quarzoszillatoren

Accuracy, Precision, and Stability

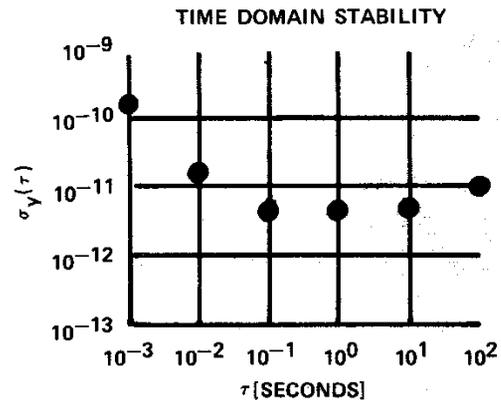


Genauigkeit (accuracy) und Stabilität (stability)

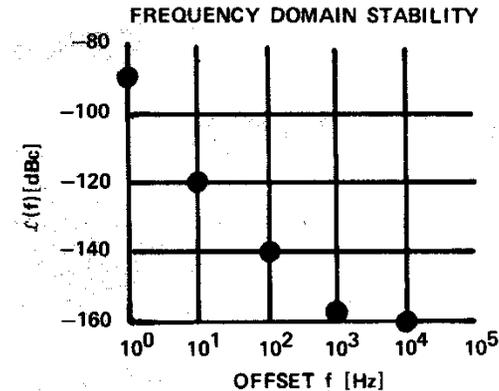
Quarzoszillatoren

- Schwingquarze haben extrem hohe Güten,
 $Q > 10000 \Rightarrow$ gutes Phasenrauschen
 -150dBc bei $\Delta f = 10\text{kHz}$
- Langzeitstabilität hängt von der Temperatur ab
 - TCXO (temperature compensated XO)
 - OCXO (oven controlled crystal oscillator)
 - Umkehrpunkt suchen
- Quarzalterung (vermutlich durch Reduzierung
 der Masse, ca. $10^{-10}/\text{Tag}$, $10^{-7}/\text{Jahr}$)

Quarzoszillatoren



Averaging Time τ seconds	Stability $\sigma_y(\tau)$
10^{-3}	1.5×10^{-10}
10^{-2}	1.5×10^{-11}
10^{-1}	5×10^{-12}
10^0	5×10^{-12}
10^1	5×10^{-12}
10^2	1×10^{-11}

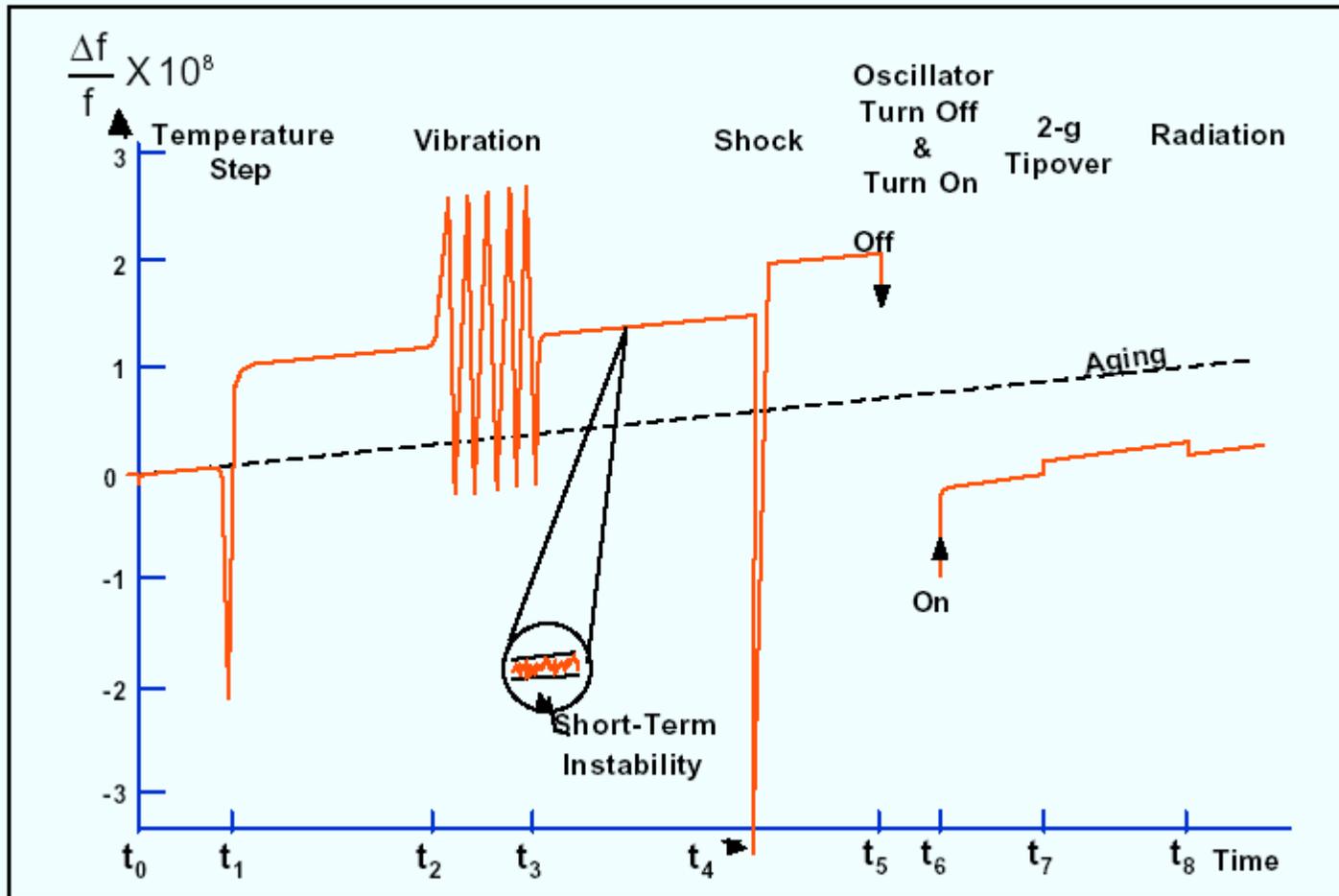


Offset from Signal f [Hz]	Phase Noise Ratio $\mathcal{L}(f)$ [dBc]
10^0	-90
10^1	-120
10^2	-140
10^3	-157
10^4	-160

- Stabilität (HP10811A/B)
 - σ als Funktion von τ (Allen Deviation)
 - dBc/Hz als Funktion von Δf

Quarzoszillatoren

Idealized Frequency-Time-Influence Behavior



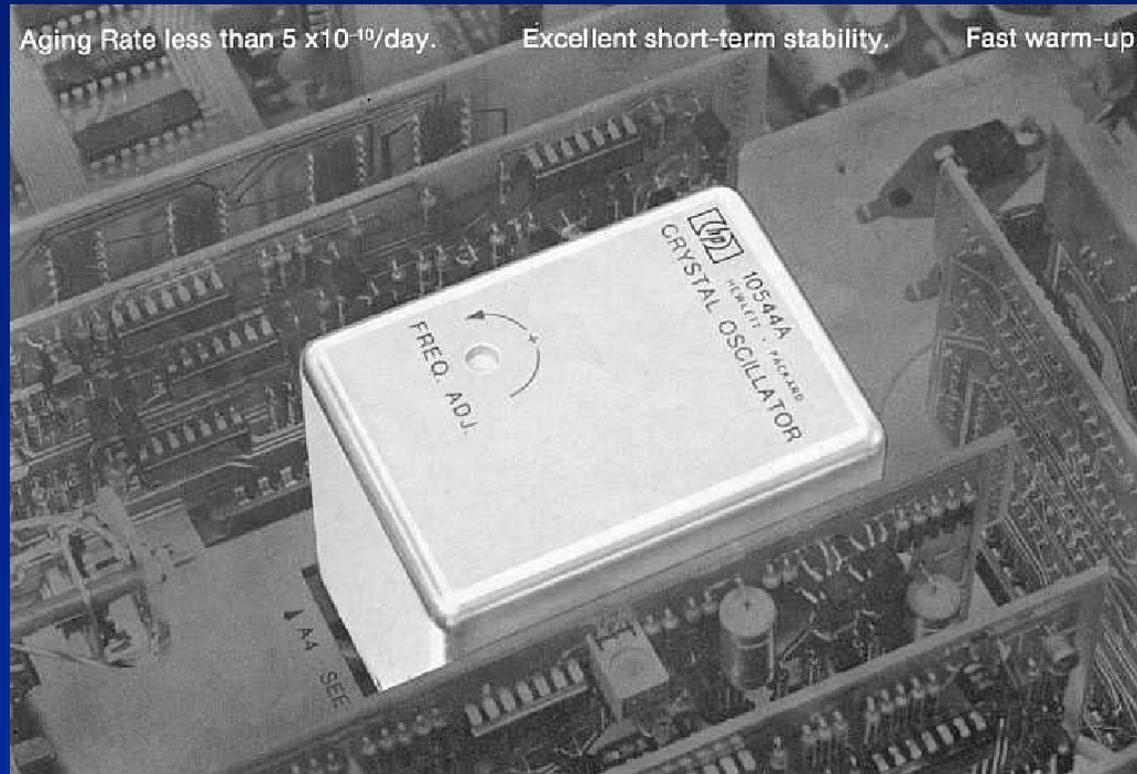
Quarzoszillatoren



- Rohde&Schwarz XSD
- Quarzfrequenz = 2,5MHz
- Ausgangsfrequenzen: 5MHz, 1MHz, 100kHz
- Genauigkeit, Spezifikation $\Delta f/f = 10^{-10}/\text{Tag}$, $10^{-7}/\text{Jahr}$
- Genauigkeit real gemessen, nach Einlauf von 2 Jahren!
 $5 \cdot 10^{-9}/\text{Jahr}$, $10^{-10}/\text{Monat}$

DJ5FN

Quarzoszillatoren



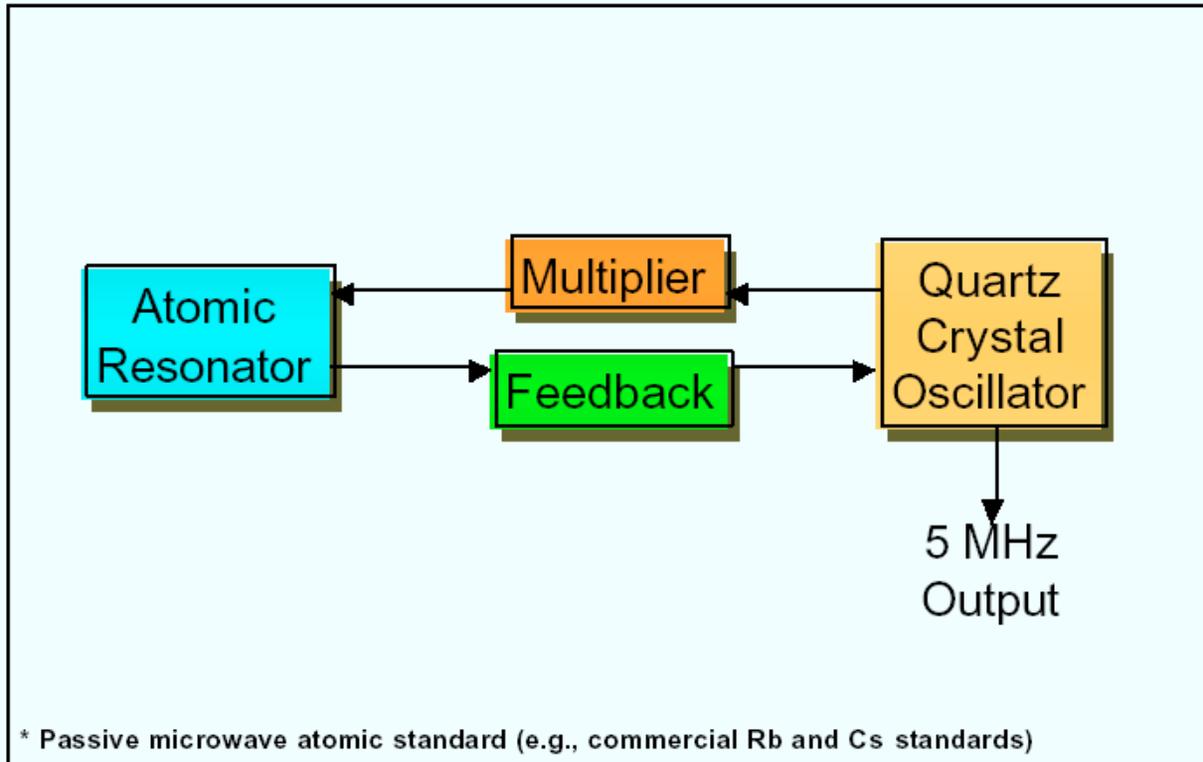
- Hewlett Packard (Agilent) HP10811, HP10544A, B, C
- Quarzfrequenz = 10MHz
- Genauigkeit, Spezifikation $\Delta f/f = 10^{-10}/\text{Tag}$, $10^{-7}/\text{Jahr}$

Atomnormale

- Nicht temperaturabhängig
- Hochstabile atomare Resonanzen
 - Rubidium
 - Cäsium
- Langzeitsteuerung eines OCXOs
 - => gute Kurzzeit- und sehr gute Langzeitstabilität
- Rubidiumnormale über Magnetfeld geringfügig einstellbar (XSRB)
- Nachteil: Rubidiumlampe hält nicht ewig
 - Cs-Normale werden beim DCF77 eingesetzt
- Langzeitstabilität:
 - Rb: 10^{-11} /Monat
 - Cs: 10^{-12} /Jahr

Atomnormale

Atomic Frequency Standard* Block Diagram

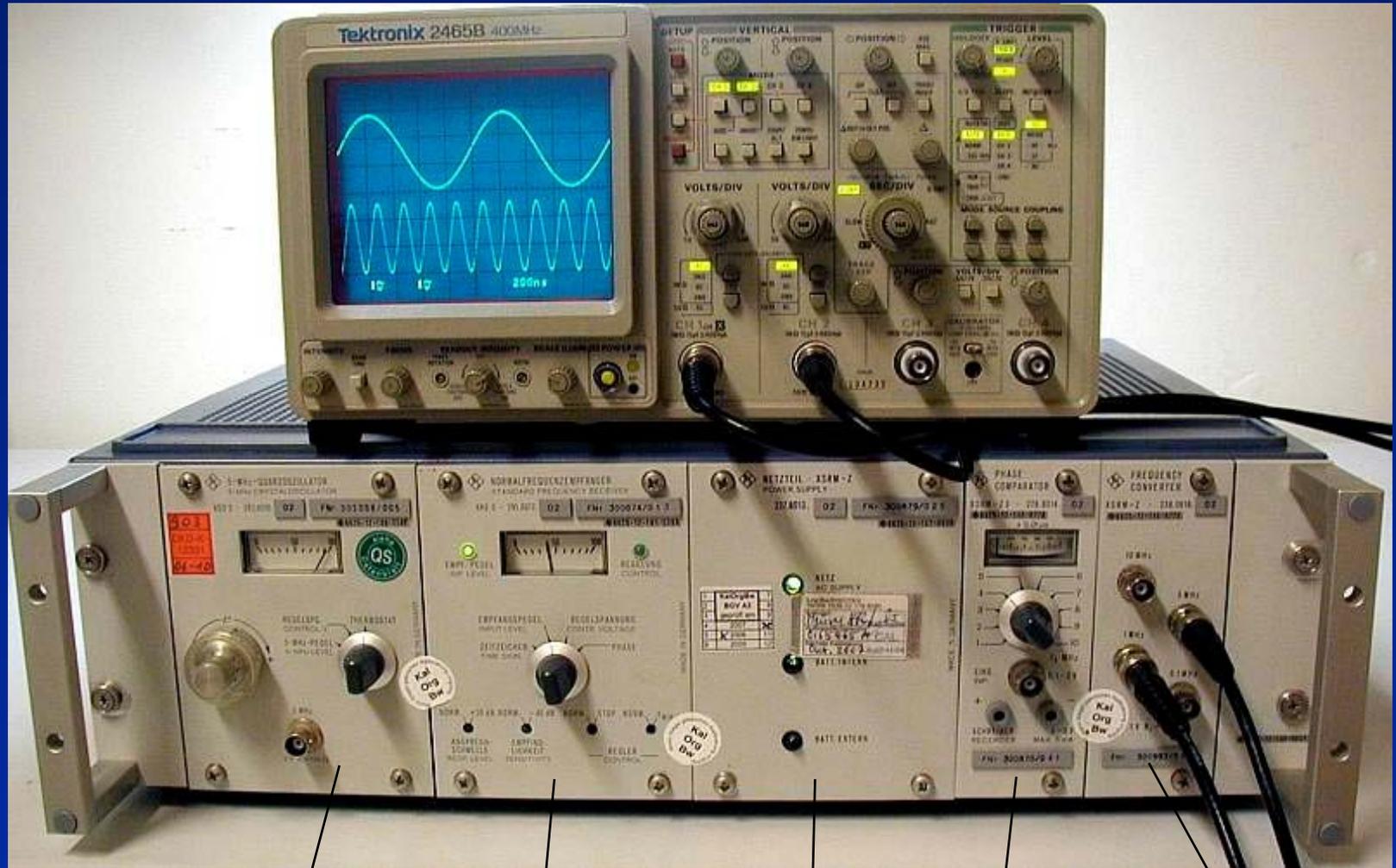


Funktionsweise (Rb-Normal, XSRB)

DCF77-Frequenznormal

- DCF77 arbeitet auf 77,5kHz
 - Mainflingen, 3Cs-Frequenznormale, die verglichen werden
 - Kontrolle über HF von PTB, Braunschweig
 - R&S, XKE2: $\Delta f/f = 10^{-11}$ bei sehr guten Bedingungen erreichbar
 - Variante für Quarzoszillator oder Rubidiumnormal
 - Problem beim Standardquarzoszillator:
 - Niedrige Vergleichsfrequenz
 - Sehr lange Integrationszeiten der PLL bei gestörtem, verrauschtem Signal, Phasenschwankungen durch Laufzeitveränderungen => Integrationszeit von vielen h
 - Alterungsdrift des OCXO
- => Integrationszeit wird auf Kompromiss eingestellt

DCF77-Frequenznormal (R&S))



OCXO
5MHz

DCF
Empfänger
XKE2

Netzteil

Phasen-
vergleichler

Frequenz-
Teiler, -Ver-
vielfacher

DJ5FN

GPS-Frequenznormal

- GPS (global positioning system, DOD)
 - Rb-Normale onboard, Nachregelung durch Kontrollstationen
 - 24 Satelliten, gemeinsame Arbeitsfrequenz für CA-Betrieb: 1,575 GHz
 - Hohe Dopplerverschiebung (=>Arbeitsfrequenz nicht direkt nutzbar)
- Standortbestimmung über Laufzeiten von den Satelliten
- absolute Zeit wird im GPS-Empfänger generiert
 - geregelter Quarzoszillator (synchrone PN-Sequenz)
 - Bausteine mit 1pps-Ausgang (Frequenznormal nach Sheers)
 - Bausteine mit 10kHz-Ausgang (Jupiter-Board)
- Steuerung eines OCXOs (Ausgleichen der Quarzdrift durch GPS)

GPS-Frequenznormal

- Kaltstart, je nach Empfangsbedingungen 3min bis 60 min
- Quarzoszillator (Jupiter) hält Konstanz bei Wegfall des GPS-Signals ca. 3 min bei.
- Bei schwankenden Empfangsbedingungen, Satellitenhandover, usw., sucht Quarzoszillator $\pm 3^\circ$ innerhalb ca. 8sec bis Lock erfolgt.
- GPS-Frequenznormale sind Stand der Technik, z.B. Synchronisation von Telekommunikationsnetze oder SFN-DVBT (single frequency network - digital video broadcasting).
- Galileo wird ähnlich funktionieren.

GPS-Frequenznormal

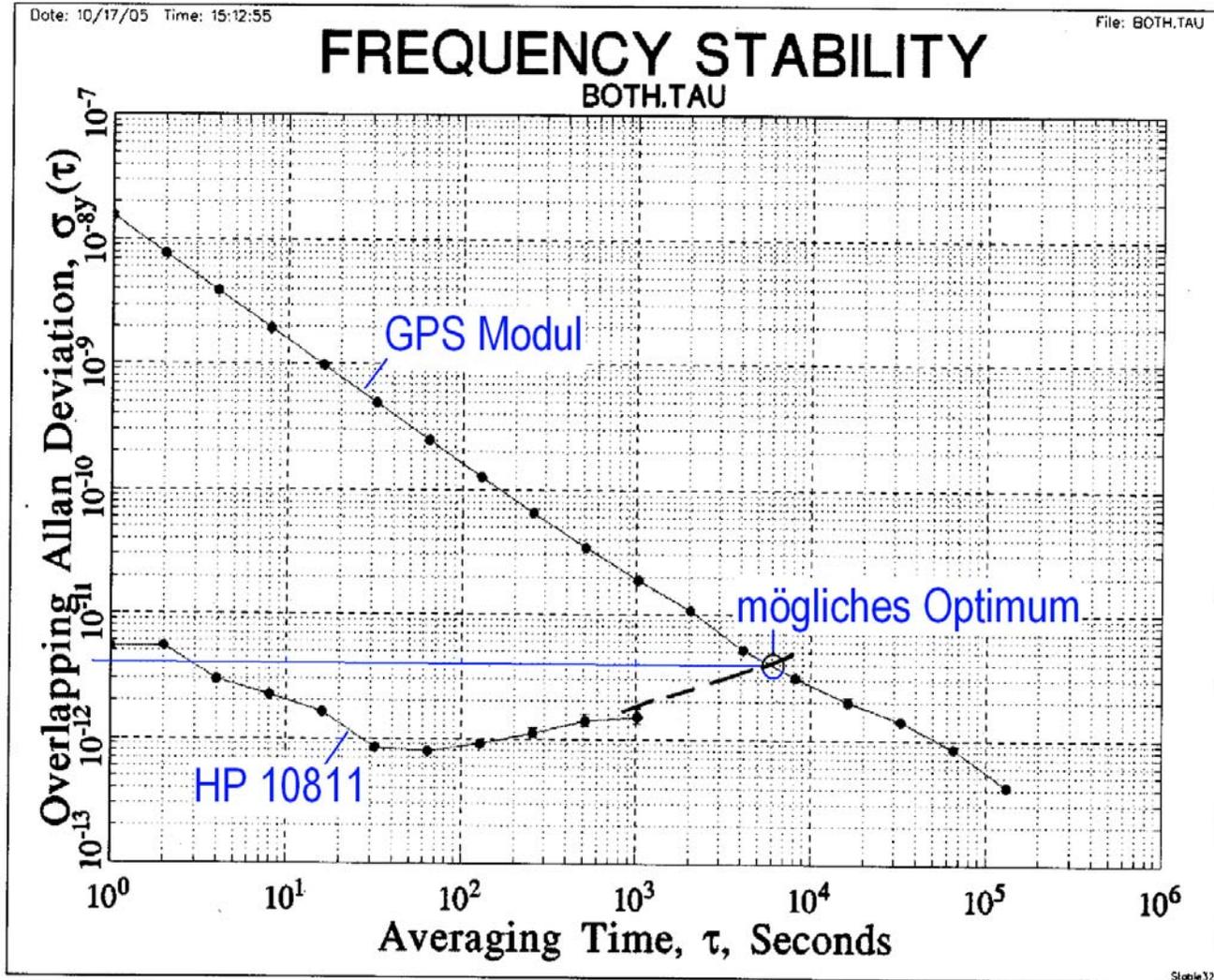


Abbildung 11: Sigma-Tau-Kurven von HP10811 und M12 in einem gemeinsamen Diagramm

GPS-Frequenznormal

- Messungen mit Jupitermodul
- starkes Phasenrauschen auf 10 kHz-Signal
- Allen Deviation (Summation der Quadrate der Abstände aufeinander folgender Messwerte, ähnlich wie Standardabweichung, jedoch nicht auf Mittelwert bezogen)
=> lange Integrationszeiten (Stunden)
=> Hohe Stabilität nur bei besten OCXOs
- => Stabilität und Genauigkeit von 10^{-13} , wie in verschiedenen Bauanleitungen angegeben, sind absurd.

Rundfunk-, TV-, DVBT-Normalfrequenz

- Analoge TV-Sender
 - analoge TV-Sender im Frequenzraster (wechselndes Moiree auf dem Bildschirm bei Gleichkanal-Interferenz mit Frequenzabweichung, zur Vermeidung Präzisionsoffset, Rb-Normale, ehemals HR, ZDF)
- analoge TV-Sender
 - gut geeignet um raschen Frequenzvergleich durchzuführen (Nutzung des kräftigen Bildträgers, Vergleich mit einstellbarem Generator mit zu testender Zeitbasis)
 - Synchronisieren eines OCXOs mit der aufbereiteten Zeilenfrequenz, $f_H = 1\text{MHz} / 64$ (sehr lange Regelzeiten)
 - keine Technik der Zukunft!

Rundfunk-, TV-, DVBT-Normalfrequenz

- Rundfunk AM-Sender

- AM-Sender weisen typischerweise keine hohe Frequenzkonstanz auf, Ausnahmen:
 - Gleichwellen-AM-Sender (z.B. 594 kHz, HR oder 801kHz, BR, hohe Konstanz zur Vermeidung von schnellen Schwebungen, Rb-Normale)
 - Ausgesuchte Sender mit hoher Konstanz, z.B. Droitwich oder Deutschlandfunk, 153kHz
- Erschwerung durch zusätzliche Phasenmodulation (Deutschlandfunk 153kHz, Frequenzvergleichsempfänger Schomandl EA 153 K)
- AM-Sender wegen der niedrigen Frequenz problematisch, lange Regelzeiten, siehe DCF77
- WWV und andere Normalfrequenzsender im Kurzwellenbereich, wegen wechselnder Ausbreitungsbedingungen, Fading und Störungen, keine hohe Frequenzkonstanz erreichbar.

Rundfunk-, TV-, DVBT-Normalfrequenz



- Rundfunk AM-Sender

Schomandl

Frequenzvergleichsempfänger EA 153 K

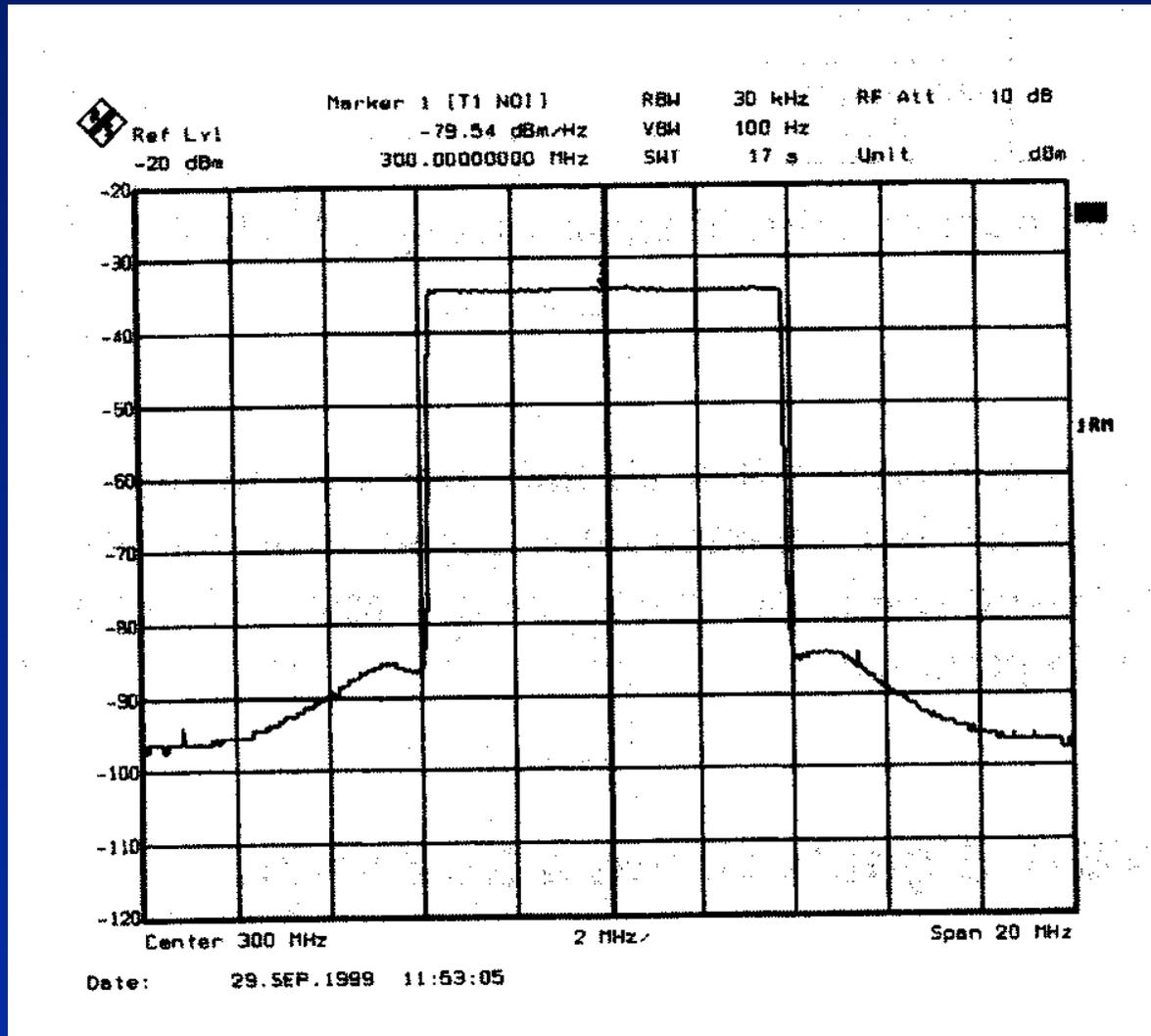
Deutschlandfunk (153kHz) als Vergleichsfrequenz für 10MHz-Eingang (1MHz, 100kHz)

DJ5FN

Rundfunk-, TV-, DVBT-Normalfrequenz

- Digitales TV (DVBT, digital video broadcasting terrestrial)
 - SFN (single frequency network)
 - 3 Senderstandorte im südhessischen Raum: Gr. Feldberg, Frankfurt, Hohe Wurzel
 - Synchronisation der drei Sender jeweils mit GPS-Normal
 - zusätzliche zeitliche Synchronisierung des Datenstroms
 - frequenzsynchrone Abstrahlung des zeitsynchronen Signals
 - Empfänger empfängt die Überlagerung aller drei Signale
 - Einbrüche im Frequenzspektrum
 - unkritisch, da ca. 6800 Unterträger (OFDM), Wegfall von 100 Trägern wird durch Interleaving und Codierung ausgeglichen
- Pilotfrequenzen zur Synchronisierung im DVBT-Spektrum

DVBT-Frequenzspektrum



- 6817 Unterträger mit 16 oder 64QAM in OFDM
- Zahlreiche Pilotsignale (z.B. bei f_0 !)

DVBT-Normalfrequenz

Messverfahren

- Synthesizer mit zu kalibrierender Zeitbasis (z.B. OCXO)
- Funkgerät (Empfänger und dessen Mutteroszillator)

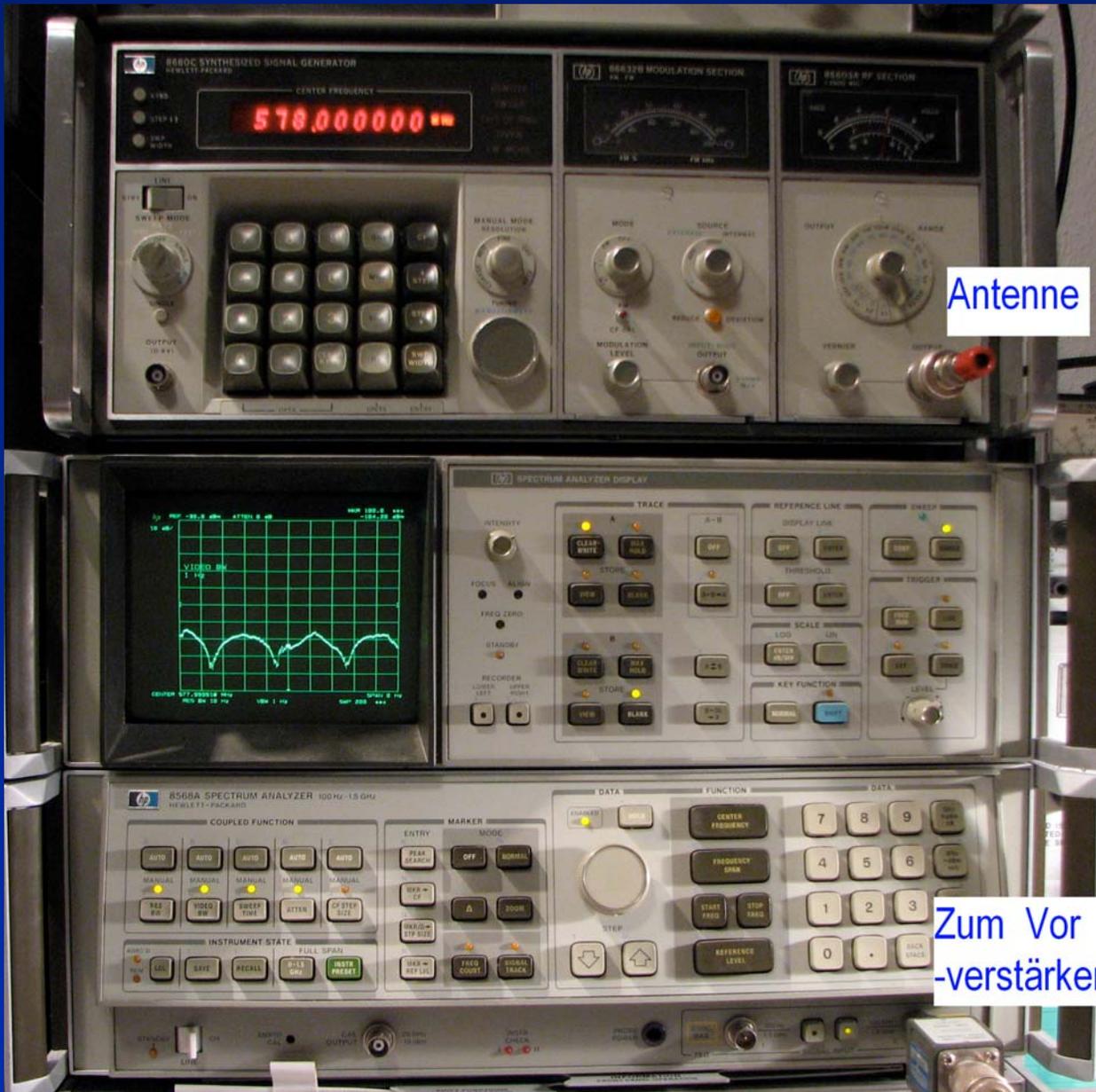
Zu 1 Benötigt werden zu kalibrierender Synthesizer, bzw. dessen Zeitbasis, Spektralanalysator (Frequenzstabilität unwesentlich, Bandbreite möglichst klein 10Hz ideal, 1kHz problematisch). Der Spektralanalysator muss i.a. wegen seiner Unempfindlichkeit (typisch NF = 25dB) mit Vorverstärker betrieben werden.

Meßbeispiel: Frequenz: 578 MHz, Zentrale Pilotfrequenz bei 578000000Hz
Spektralanalysator im ZERO-SPAN auf CF = 578MHz, B = 10Hz, kleines Drahtstück als Antenne; Generator auf 578.000000MHz, CW, z.B. -70dBm einstellen, kleines Drahtstück als Antenne und im Zero-Span Spektralanalysator ablesen.

Bei z.B. 10 s Schwebungsperiode ist $\Delta f/f = 1/(578000000\text{Hz} \cdot 10\text{s}) = 1.73 \cdot 10^{-10}$

Wegen schwankender Übertragungseigenschaften ist nicht viel mehr als $\Delta f/f = 10^{-10}$ zu erwarten. Die DVBT-Pegel mehrerer Sender sind für diese Messung im Raum Darmstadt ausreichend (keine Außenantenne).

DVBT-Normalfrequenz



Zu testender
Messsender
HP8660C

(ggf. ext. Zeit-
basis

Spektral-
analysator
HP8568A

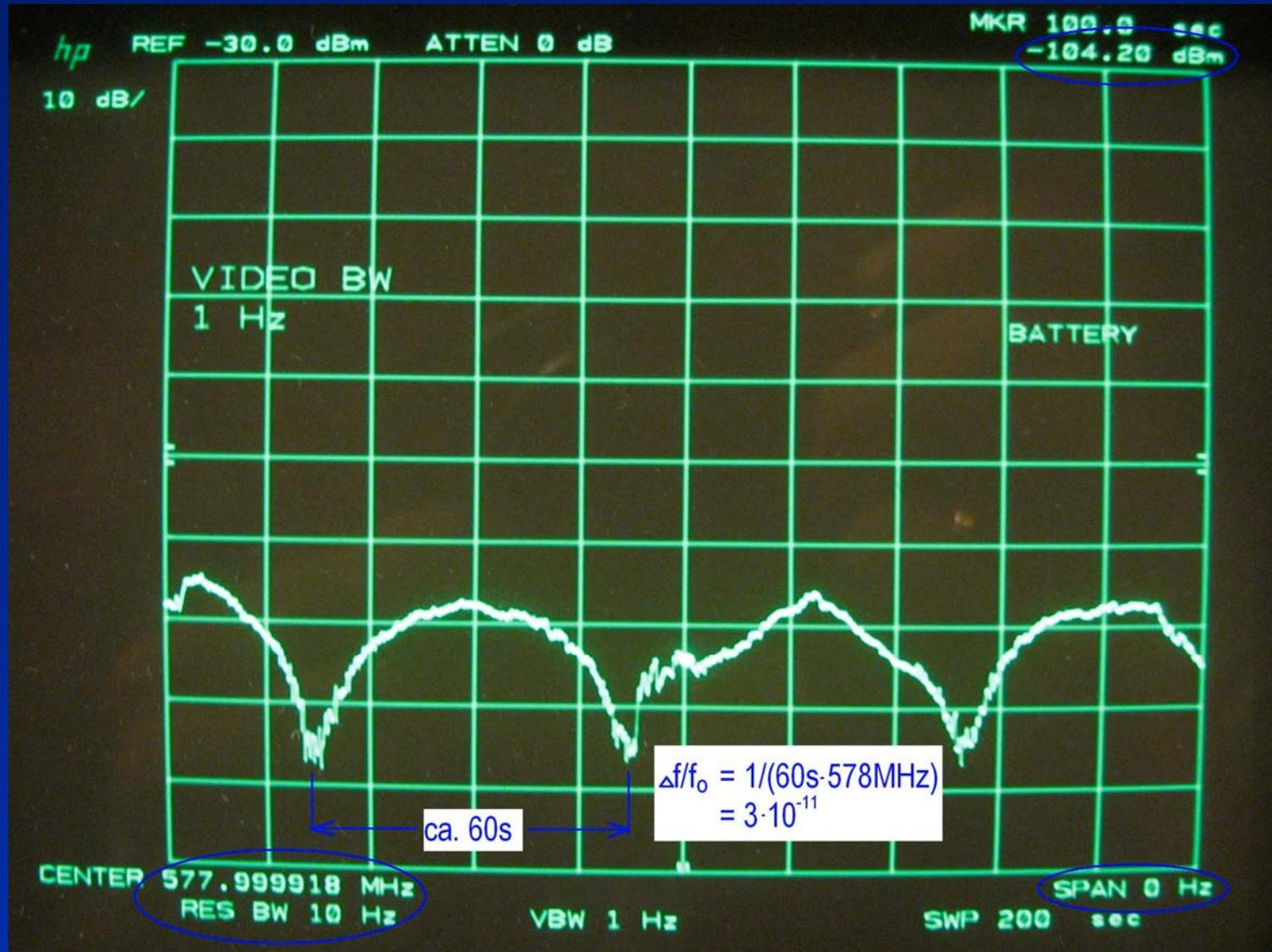
Antenne

Antenne

Zum Vor-
verstärker

DJ5FN

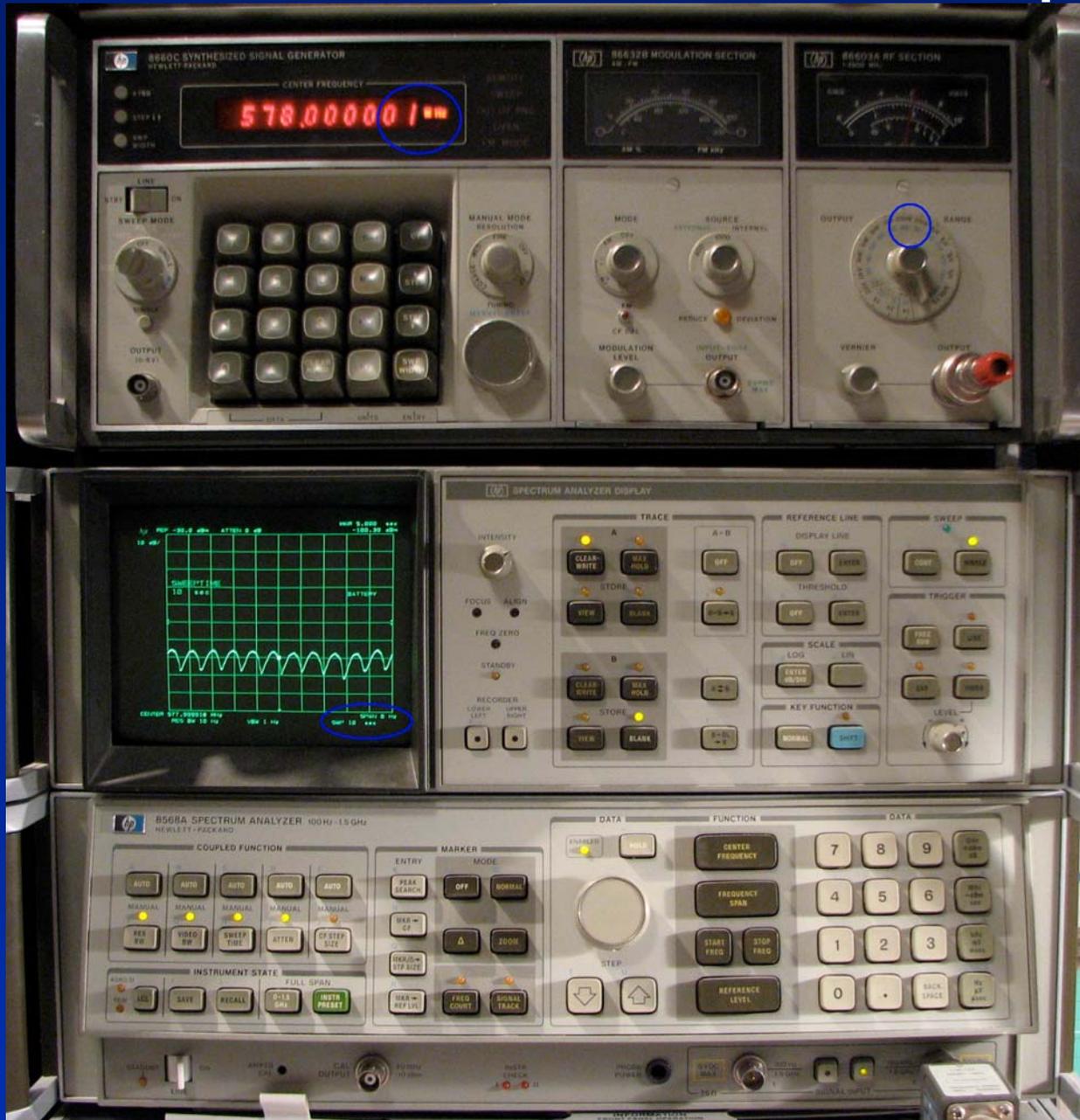
DVBT-Normalfrequenz



Messergebnis mit externer Zeitbasis XSD

DJ5FN

DVBT-Normalfrequenz



Schnelles
Messergebnis
mit 1Hz Offset
(dann mit
-1Hz Offset)

Schwebung
mit 1Hz
(Zero Span)

DVBT-Normalfrequenz

Zu 2 Funkgerät (Empfänger und dessen Mutteroszillator)

Benötigt werden zu kalibrierendes Funkgerät, dessen Mutteroszillator gemessen werden soll. Betriebsart: SSB oder CW.

Meßbeispiel: Frequenz: 198,5MHz, Zentrale Pilotfrequenz bei 198,500000Hz Empfänger auf 198,5MHz einstellen, möglichst kleine Bandbreite.

Bei CW muss zuvor der Offset des BFOs bekannt sein, z.B. 400 Hz, dann Hörfrequenz 400 Hz einstellen (ggf. mit NF-Generator 400 Hz vergleichen oder mit Oszilloskop messen).

Ablesen der eingestellten Frequenz am RX, $f(\text{RX})$:

$$\Delta f/f = (f(\text{RX}) - 198,500000) / 198,500000 \quad \text{fertig!}$$

Als Variante kann auch wieder ein zu messender Synthesizer mit seiner Zeitbasis und nun der Empfänger anstelle des Spektralanalysators verwendet werden. Die Schwebung wird sich am besten im AM-Betrieb messen lassen. Ggf. am Synthesizer z.B. $\pm 200\text{Hz}$ einstellen und Mittenfrequenz auf gleiche Frequenz (ca. 200Hz) abgleichen.

DJ5FN

DVBT-Normalfrequenz



Aufbau einer praktischen Messung mit Empfänger IC R7000 und Ergebnis (Kanal 8: 198.500 000MHz)

Zusammenfassung

- Hohe Frequenzkonstanz ist teuer
- Quarz mit Ofen ist in den meisten Fällen ausreichend (ebay: 300EUR)
- Bei höheren Ansprüchen ist die Kontrolle eines OCXOs mittels GPS Stand der Technik (Eigenbau >600EUR)
- Rubidiumnormal (ebay: >kEUR, Rb-Lampe lebt nicht ewig, R&S garantiert nur 3Jahre)
- Schneller Vergleich einer schon bestehenden Zeitbasis mit DVBT ideal (hoher Messgeräteaufwand)
- VIEL SPASS mit hochgenauer Frequenz!

Literatur

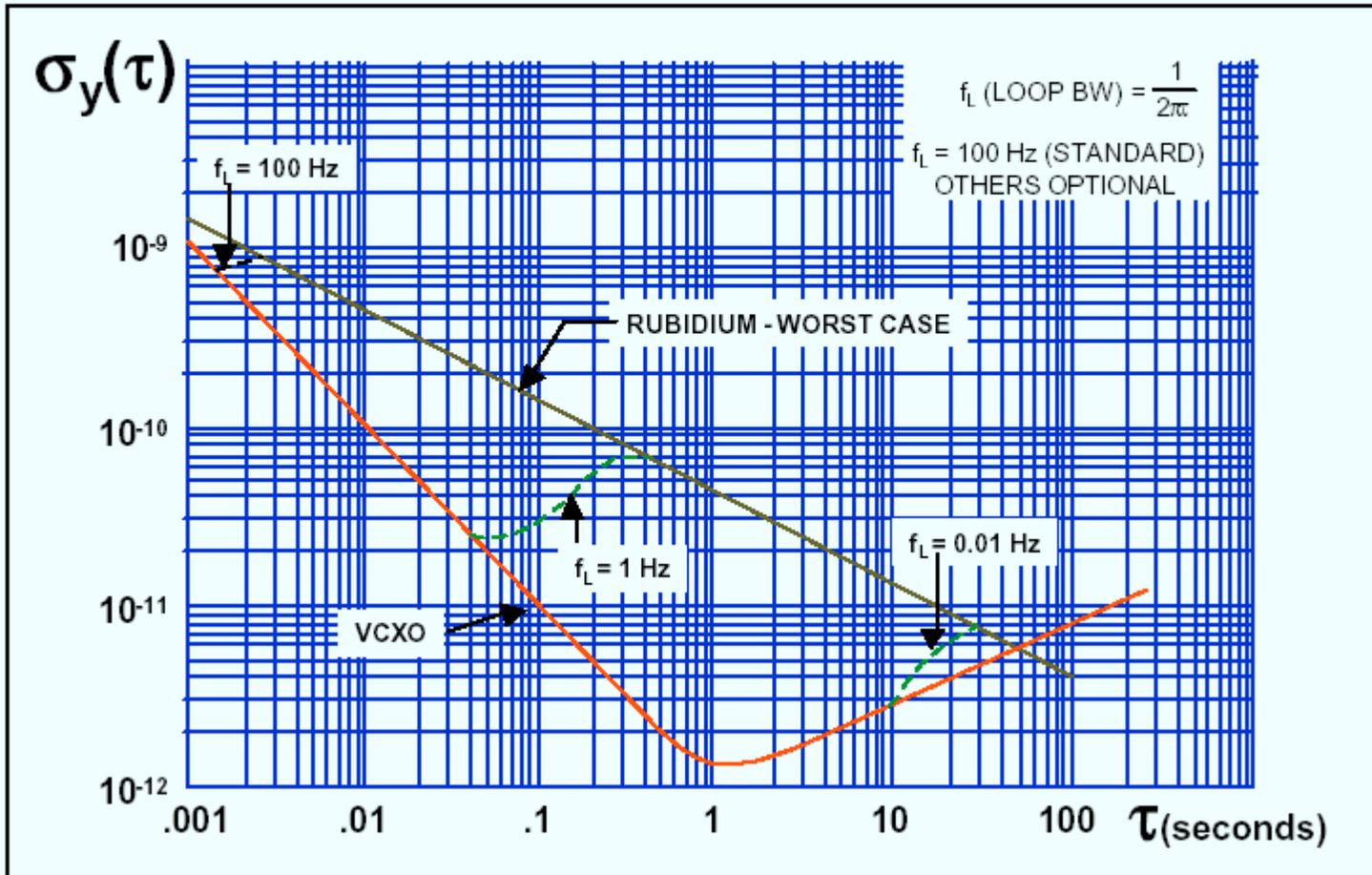
- [1] Fritz Trenkle
Bordfunkgeräte - Vom Funkensender zum Bordradar
Bernhard & Graefle Verlag
- [2] John R. Vig
Quartz Crystal Resonators and Oscillators
Tutorial, Jan 2007 (Internet)
- [3] Hewlett Packard, 10544C, Quartz Crystal Oscillator
Operation&Service Manual
- [4] Ulrich Bangert, DF6JB
Über die Stabilität von Oszillatoren und Frequenznormalen
(Internet)
- [5] Brooks Shera, W5OJM
A GPS-Based Frequency Standard
QST, July 1998
- [6] Walter Fischer
Digital Television
Rohde&Schwarz, 2004

Fragen und Antworten ...

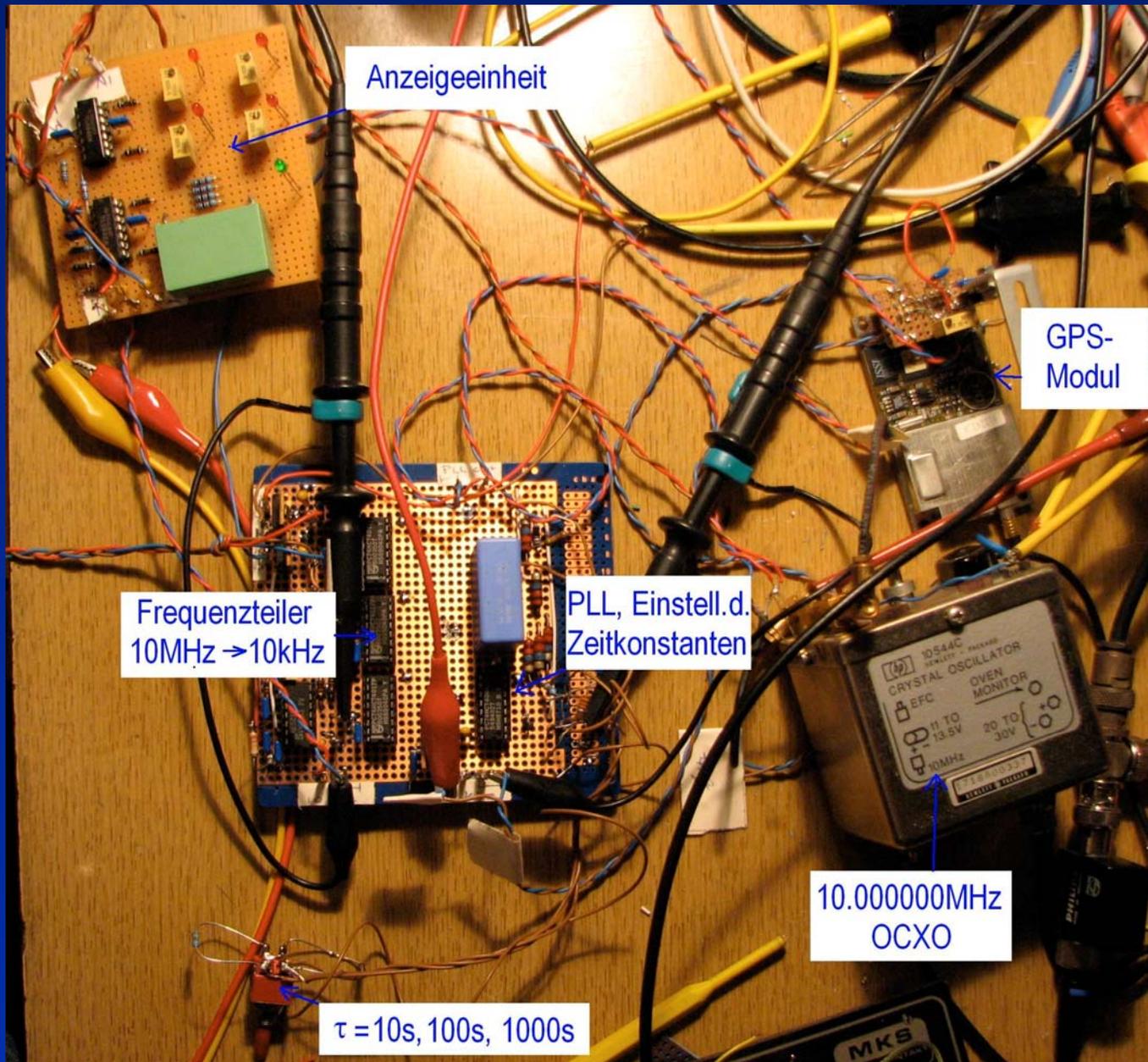
Heinz
Schmiedel, DJ5FN

Rb-Frequenznormal

Short-Term Stability of a Rb Standard



GPS-Frequenznormal



DJ5FN