

Het meten van ruisspectra

HARKE SMITS, PA0HRK

26 APRIL 2026

Inhoud

1. Motivatie
2. RF Faseruis spectra
3. LF Faseruis spectra
4. Hardware en software
5. Literatuur

Motivatie

Waarom zou een RF amateur (als ik) LF ruis spectra willen meten?

Daar is een goede reden voor:

Universeel geldt: elke RX/TX heeft baat bij een ruisarme LO. Dit geldt ook voor de clock oscillator van een SDR. Of, waarom niet, voor een audio DAC/ADC.

Een ruisarme microgolf LO heeft een ruisarme referentie oscillator (bijv: 10-100 MHz) nodig.

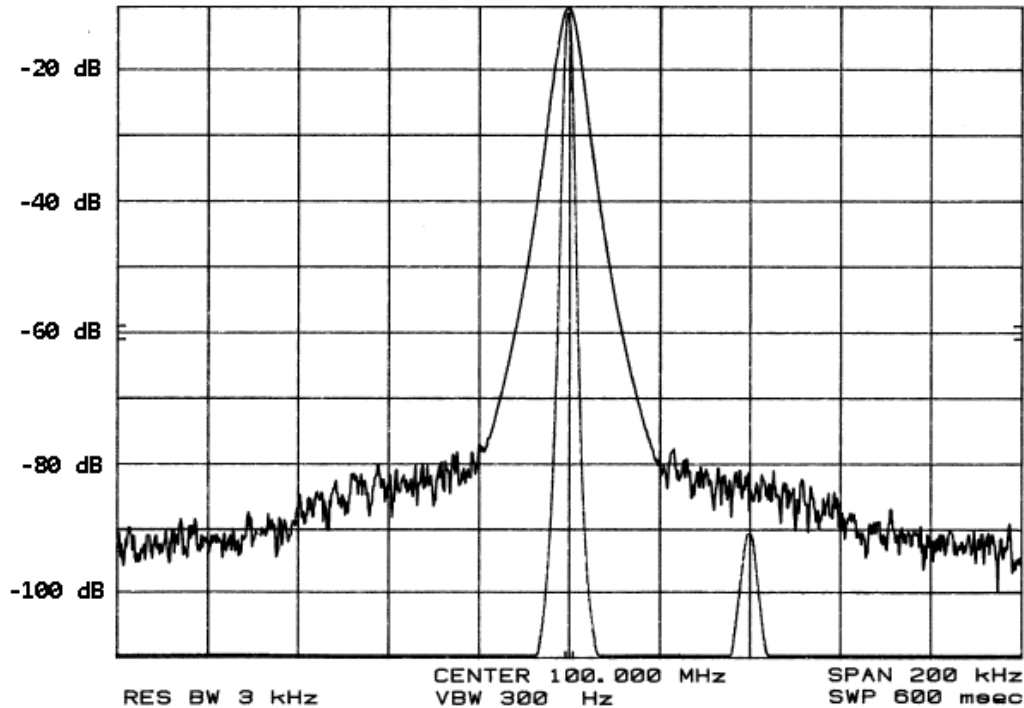
Een ruisarme referentie oscillator vereist een ruisarme voedingspanning. Dat geldt ook voor de fasedetector en VCO in een microgolf PLL.

Een ruisarme Oscillator wil zeggen: met geringe faseruis. Amplitude ruis bestaat ook maar is minder storend.

Dit staat los van het ruisgetal van de ontvanger.

Eerst iets over RF faseruis: wat is het en waarom moet het zo laag mogelijk zijn (meestal)

Faseruis



Drie signalen: 1: nagenoeg ruisvrij signaal (100 MHz), 2: zelfde signaal met zijbandruis (faseruis), 3: Signaal dat door deze ruis gemaskeerd wordt (100.04 MHz).

Verder van de draaggolf neemt de faseruis gewoonlijk af.

Faseruis: een voorbeeld

De faseruis neemt bij vermenigvuldigen toe met:

$20 \log(N)$ in dB, N = vermenigvuldigingsfactor

Dit komt neer op 6 dB per oktaaf

Dit geldt voor “gewoon” vermenigvuldigen (klassieke DB6NT LO's), maar ook voor PLL's.

Rekenvoorbeeld:

$F_{osc} = 100$ MHz, dit is de referentie frequentie

Werkfrequentie = 24.144 GHz (met IF = 144 MHz): de LO is dan 24 GHz.

$N = 240$, daaruit volgt een minimale ruistoename van: 47.6 dB.

Conclusie:

1. een lage faseruis op de eindfrequentie vereist een “schone” referentie oscillator.
2. Houdt N zo klein mogelijk (start met een relatief hoge referentie frequentie)

Faseruis op VHF

Ook op lagere frequenties van belang.

Denk aan contesten op 2 m. Sommige sets waren berucht om hun faseruis. Als je daar dan een eindtrap achter zet....

In plaats van een 38.667 MHz kristal werd later wel een 116 MHz kristaloscillator toegepast voor transverters van 2 m naar 10 m. Scheelt maximaal 9.5 dB faseruis.

Een schone LO is zowel bij ontvangst als bij zenden voordelig.

In de ontvanger verbetert het grootsignaal gedrag: heb je minder last van stoorsignalen.

Bij zenden hebben vooral anderen profijt van je schone signaal.... Denk hierbij bijv ook aan de spectrale kwaliteit van bakenzenders.

Faseruis wordt gemeten vanaf dicht bij de carrier (< 10 Hz) tot tientallen kHz of meer, tot maximaal 1 MHz. Aangezien het spectrum symmetrisch wordt verondersteld, wordt meestal een helft van het spectrum weergegeven.

Faseruis meten

Er zijn vele methoden. We bespreken er twee.

Vaak wordt een spectrum analyzer gebruikt, maar die is meestal niet goed genoeg voor onze toepassing. Alleen bruikbaar voor een globale eerste indruk. (Uitz: > €100k instrumenten....)

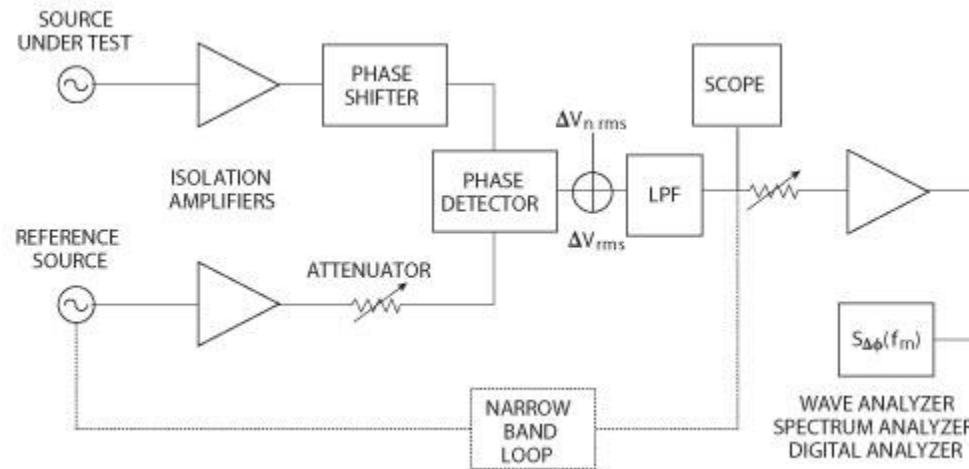
De fasedetector methode is veel beter geschikt omdat die gevoelig is en goed zelf te bouwen. Er zijn overeenkomsten met ruismeting aan DC voedingen.

De DUT en de referentie (op dezelfde frequentie) worden aangeboden aan een fasedetector. Met een PLL wordt het faseverschil op 90 graden gehouden. De fasedetector werkt als vermenigvuldiger (mixer).

Toe te passen goniometrie formule: $\sin(\alpha)\cos(\beta) = \frac{1}{2}[\sin(\alpha+\beta) + \sin(\alpha-\beta)]$

- Referentie signaal: $V_r(\omega t) = V_r \cdot \sin[\omega t + \phi_r(t)]$
- Signaal DUT (= meetobject): $V_d(\omega t) = V_d \cdot \cos[\omega t + \phi_d(t)]$
- invullen: $\frac{1}{2} V_r \cdot V_d \{ \sin[2\omega t + \phi_r(t) + \phi_d(t)] + \sin[\phi_r(t) - \phi_d(t)] \}$
- Na laagdoorlaatfilter: $\frac{1}{2} V_r \cdot V_d \cdot \sin[\phi_r(t) - \phi_d(t)]$
- Bekend is: $\sin(x) = x$ voor kleine x
- Dit geeft: $k \cdot \Delta\phi(t)$, fase verschil signaal, dit is een zeer gering lf signaal!

Algemene opzet meten faseruis



Dit is een mogelijke implementatie van een Phase Noise Test set (PNTS). Mijn eigen PNTS naar ontwerp van DG4RBF uit UKW-Berichte. Spectraal analyse met Audiometer, freeware van DG8SAQ op PC met geluidskaart (Focusrite Scarlett Solo).

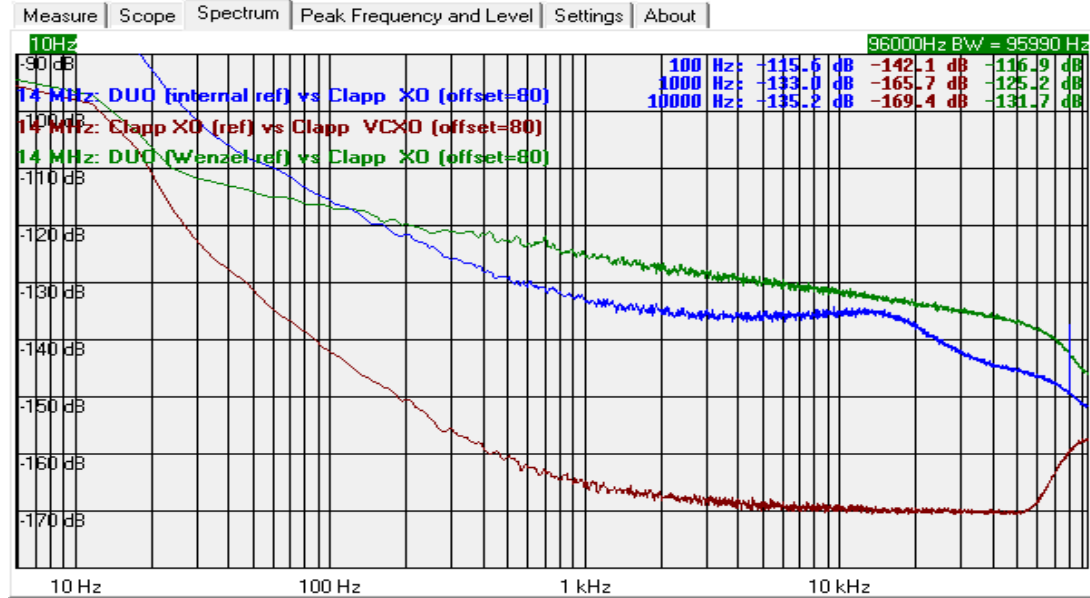
Voorbeeld:
Faseruis van FDM-DUO @ 14 MHz

PNTS: DG4RBF/Audiometer

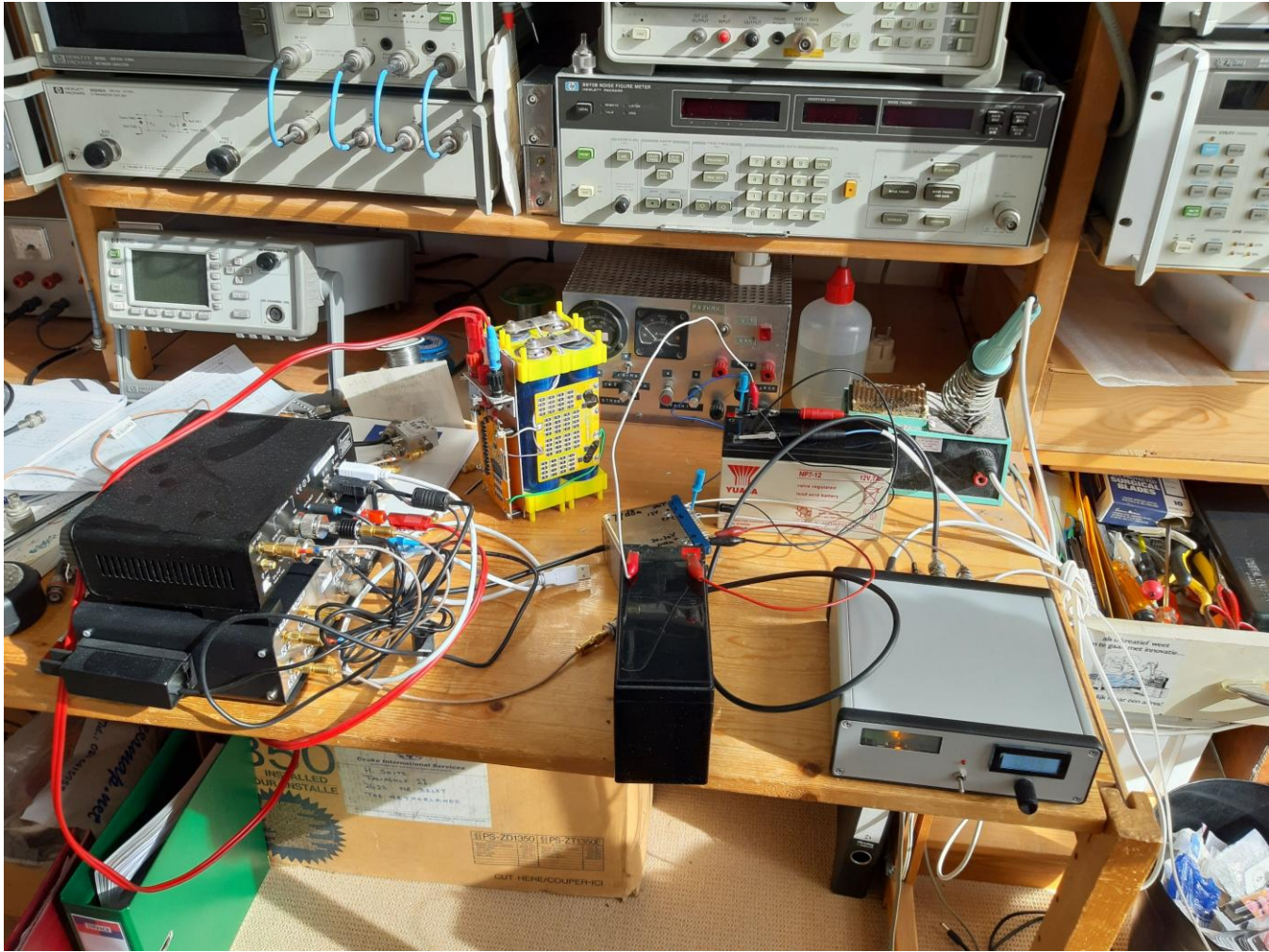
Geluidskaart beperkt LF-bereik: -3 dB grens bij 73 kHz. Sample freq: 192 kHz.

Bruine curve: een van mijn beste 14 MHz Clapp oscillators

Clapp metingen bevestigd op een FSWP



Meting aan 10 MHz Wenzel vergeleken met een HP10811



Meting aan 14 MHz kristaloscillatoren



Cross correlation principle

Much more complex hardware

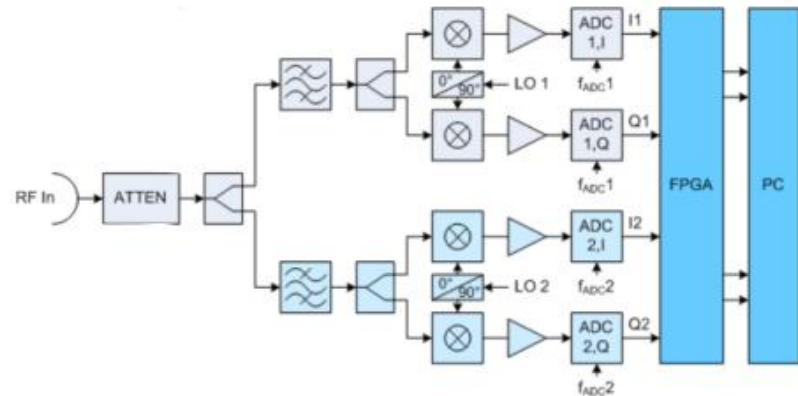
Long(er) computation time

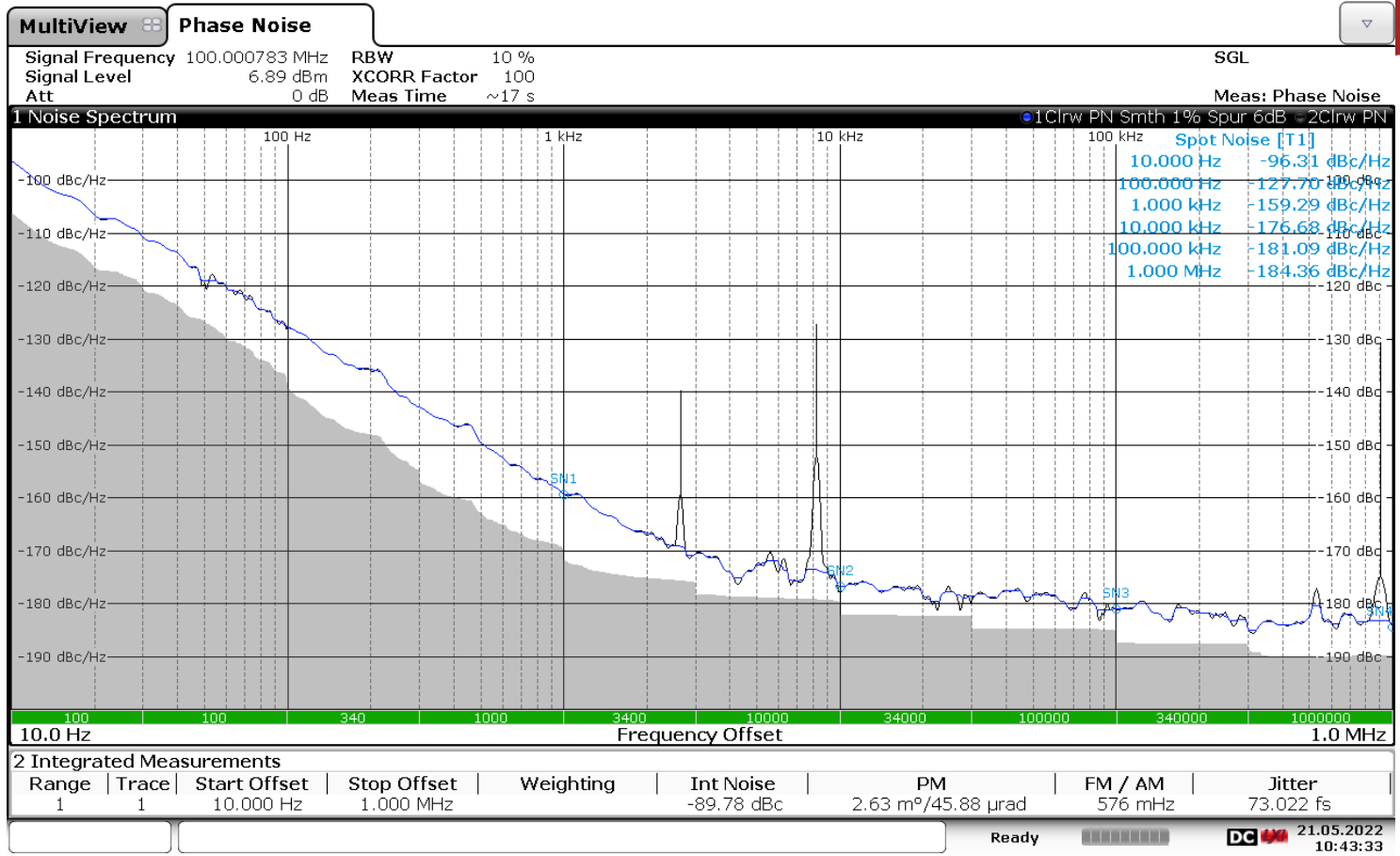
(lets forget the mathematics)

Expensive instrument (FSWP)

Dynamic range at least 20 dB better compared to previous method!

(Thanks R&S)





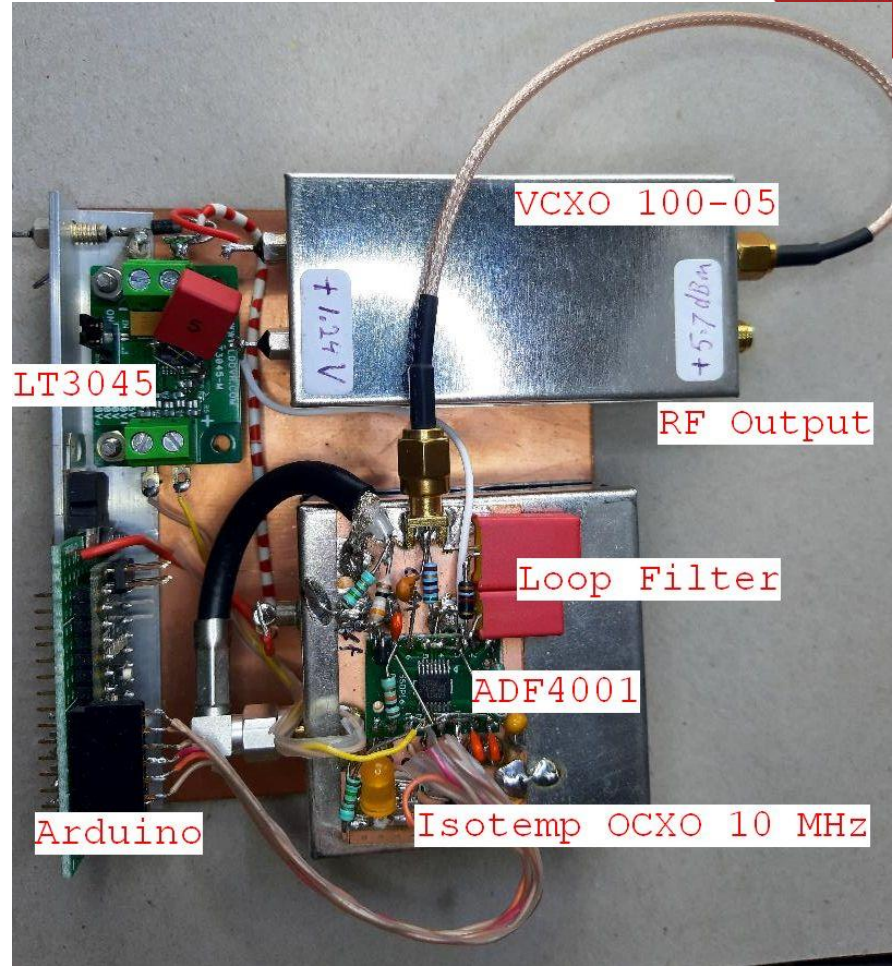
10:43:33 21.05.2022

De faseruis van een van mijn goede 100 MHz kristal referentie oscillatoren als gemeten op een FSWP van

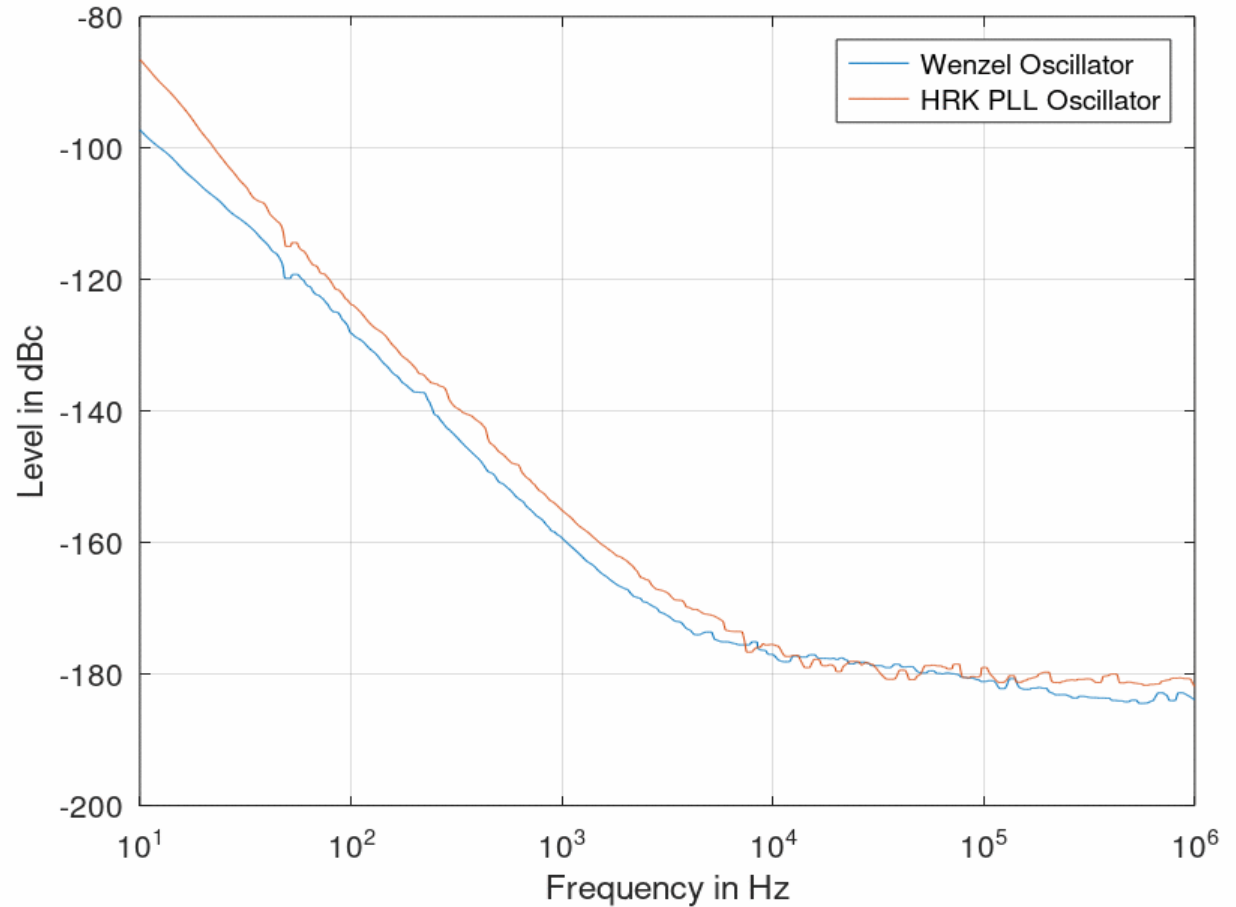
Rohde&Schwartz



Realisatie van een 100 MHz referentie oscillator met lage faseruis.
Gestabiliseerd door een 10 MHz OCXO



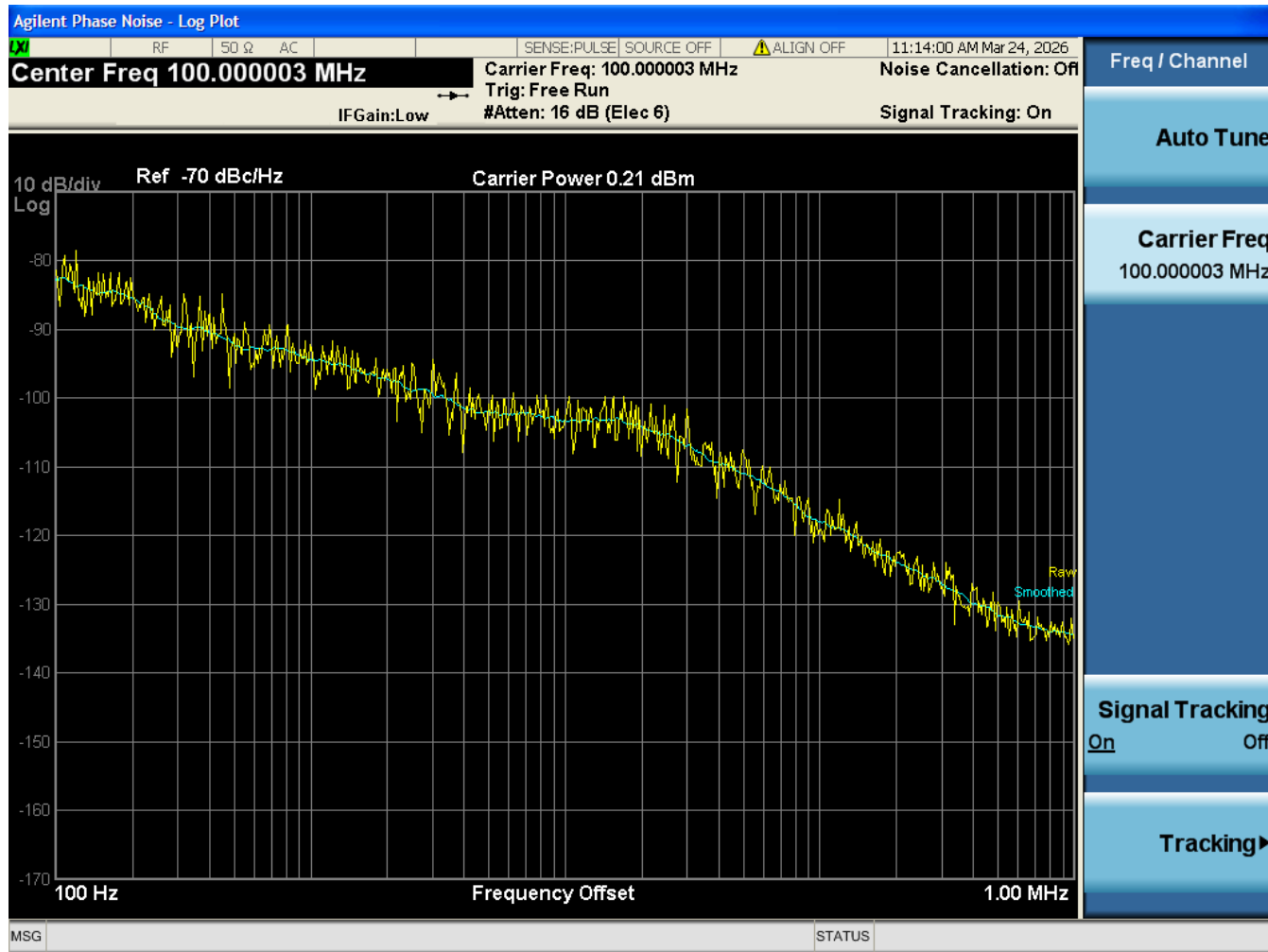
Noise Spectrum 100 MHz Crystal Oscillators



Enkele kenmerken:

- Tot 1-2 kHz ruisspectrum gedomineerd door kristal
- Wenzel kristal is beter
- 1/F hoek van het actieve element (fet)
- Horizontal deel van de curve: algemene verliezen
- Note: csv data van FSWP, genormaliseerd

Zelfde oscillator nu met goede spectrum analyzer gemeten (N9020A MXA signal analyzer)



Conclusies meten faseruis

- Het is goed mogelijk oscillatoren te bouwen met een lage faseruis
- Daarbij voedingscircuit in acht nemen. Ruis in de voeding kan op twee manieren de faseruis van een oscillator beïnvloeden:
 - Additief, via de collector/drain spanning
 - Door middel van mengen: een oscillator is een niet lineaire schakeling
- Kies een hoge referentie frequentie voor een microgolf LO
- Het kristal heeft bij voorkeur de SC snede
- Het meten van faseruis is haalbaar voor de gevanceerde amateur.
- Bij de fasedetector methode heb je altijd een (betere) referentie oscillator nodig op dezelfde frequentie, dat beperkt het toepassingsgebied, die gelocked moet kunnen worden. Ik kan daarom alleen meten op 10, 14 en 100 MHz.
- Er gaat niets boven een FSWP (of iets dergelijks.....)

Van RF naar LF Spectra

We hebben gezien dat het bouwen van een ruisarme kristaloscillator goed mogelijk is.

Bij gedetailleerde beschouwing van ruisarme kristaloscillatoren moet je ook de voedingsschakeling meenemen, want die produceert ruis (uitgezonderd directe batterijvoeding).

Spanningsstabilisatie met een zenerdiode, zoals vroeger wel toegepast, is onbruikbaar.

Maar een LM723 of een driepoot (78xx)? Of iets veel moderners?

Dat gaan we nu onderzoeken.

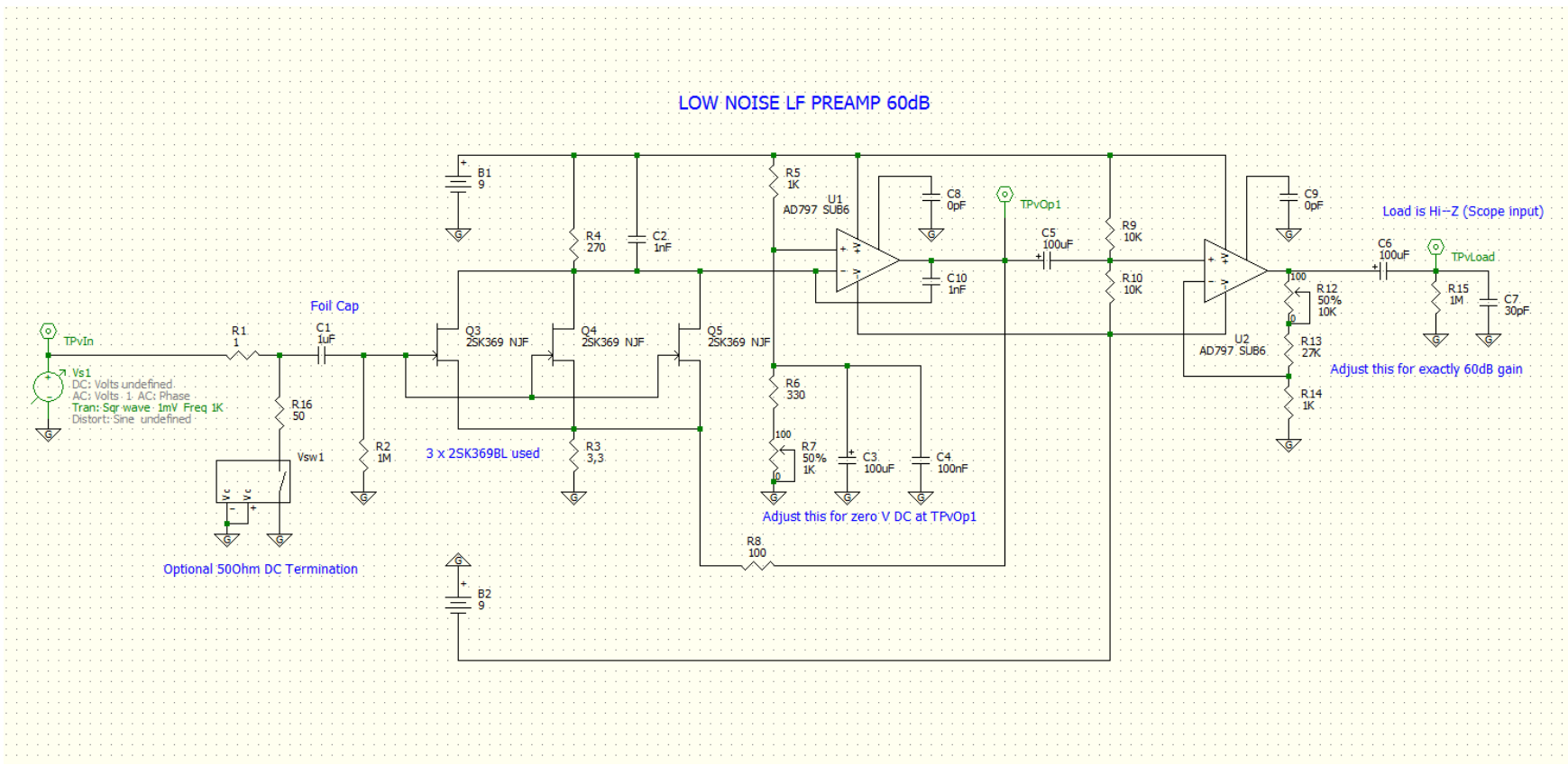
Daarvoor hebben we een zeer gevoelige LF versterker nodig (ULNA). Wenzel, fabrikant van zeer goede OCXO's, heeft daar over gepubliceerd. Een dergelijke ULNA zit ook in de PNTS.

Deze versterker wordt aangesloten op een geluidskaart (Focusrite Solo), net als bij de faseruismetingen, met een Spectraal analyse programma (Audiometer van DG4SAQ).

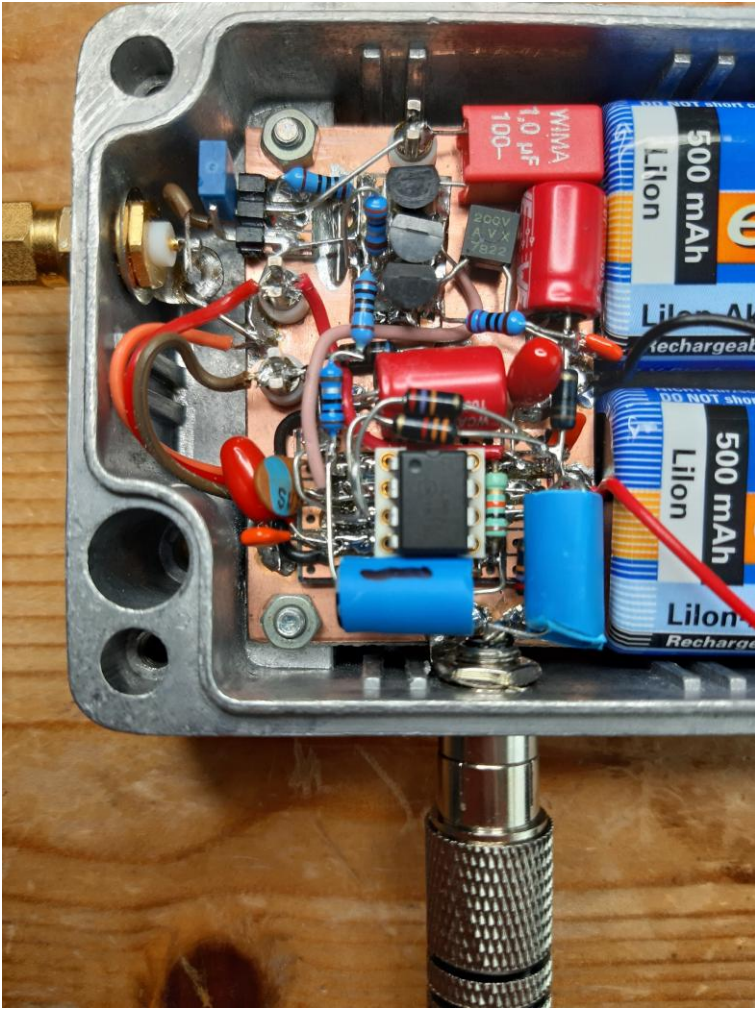
De versterker heeft een versterking van 60 dB, dmv twee ruisarme opamps, en een zeer lage eigenruis. Aan de ingang worden een aantal ruisarme fetjes parallel geschakeld. N fetjes parallel geeft een ruisspanningsvermindering van \sqrt{N} . Audiofanaten gaan soms tot 8 stuks.

De metingen worden gedaan in een kooi van Faraday (koekjes trommel)

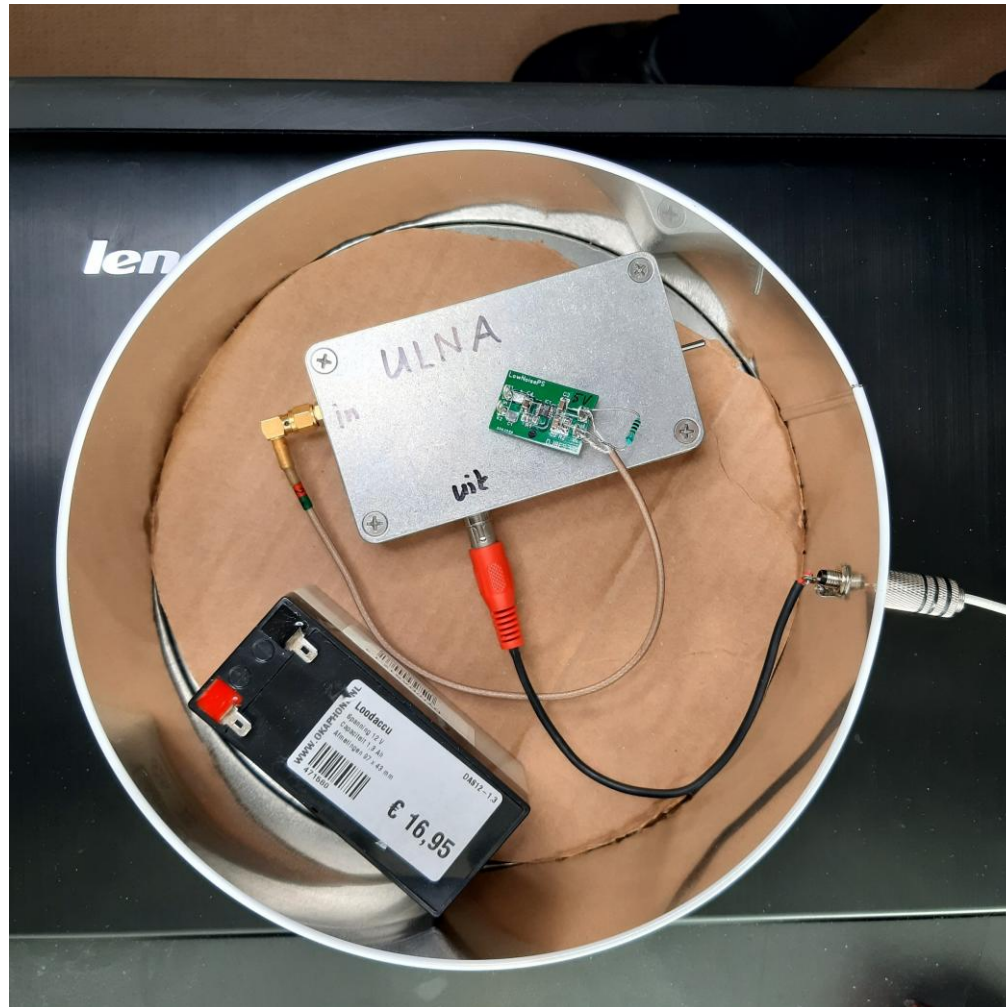
De "Wenzel" versterker



ULNA, variant op de Wenzel Ina



LF ruismetingen in een kooi van Faraday



Hoe goed is deze ULNA?

Terug naar thermische ruis, ook wel Johnson noise genoemd:

Definitie thermisch ruisvermogen: $P_n(f) = kTB$ in Watt.

k = constante van Boltzman ($1.38 * 10^{-23}$ J/K)

T = absolute temperatuur in Kelvin

B = bandbreedte in Hz

Dit is breedband ruis (witte ruis) over een groot frequentie bereik en bestaat uit fase en amplitude ruis in gelijke mate. Faseruis is in effect dominant.

Daarnaast zijn er nog andere vormen van ruis, vooral $1/f$ ruis is belangrijk.

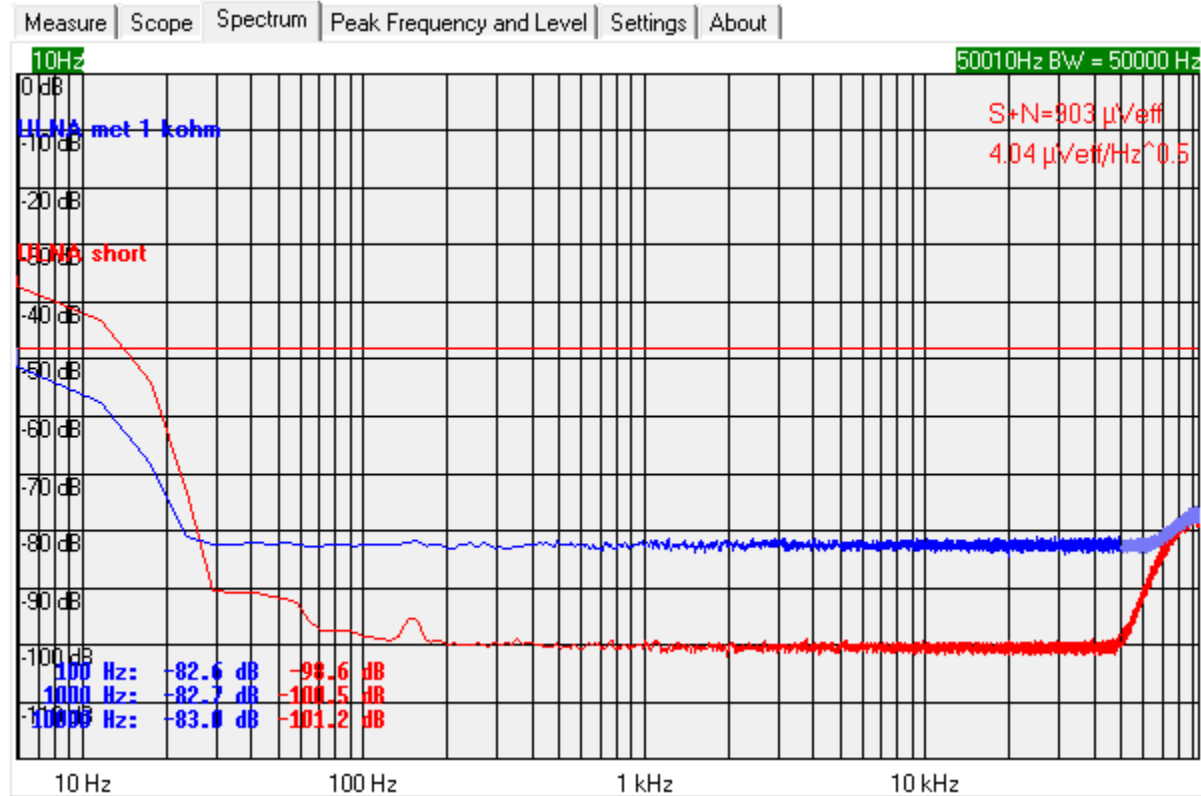
Bij kamertemperatuur in 1 Hz bandbreedte:

$P_n(f) = -174$ dBm, bij 2 kHz bandbreedte: $P_n(f) = -141$ dBm, ongeveer de detectiegrens van een SSB ontvanger.

De ruisspanning volgt uit: $(V_n)^2 = 4kTBR$, R is weerstand of impedantie

De factor 4 komt voort uit het aantal ruimtelijke vrijheidsgraden van de ladingen in de weerstand en uit het feit dat alleen de axiale bewegingscomponent bijdraagt aan de uitgangsruis.

De eerste metingen in de kooi



Rode curve: ULNA kortgesloten: eigenruis

Blauwe curve: weerstand van 1 kohm

Ondanks kooi is 50 en 150 Hz zichtbaar, 1/f ruis natuurlijk ook

De meting gaat tot 96 kHz, maar de geluidskaart tot 73 kHz (-3dB)

De meethandbreedte bedraagt: 50 kHz

Interpretatie van de eerste metingen

De gemeten waarden moeten door de versterking van de ULNA gedeeld worden.

De versterking bedraagt precies 60 dB, dit is 1000 keer (spanning).

De meetbandbreedte bedraagt 50 kHz (van 10 Hz tot 50.010 Hz)

Met 1 kohm aan de ingang meten we: $S+R = 903 \mu V_{\text{eff}} / 1000 = 903 \text{ nV}_{\text{eff}}$

Dit komt overeen met een spectrale dichtheid van: $4,04 \text{ nV}_{\text{eff}} / \sqrt{\text{Hz}}$

Merk op: de verhouding tussen deze getallen is 223,6 nl $\sqrt{B} = \sqrt{50000}$

We berekenen de thermische ruisspanning van deze weerstand. De formule is afgeleid van het thermisch vermogen (2 sheets terug):

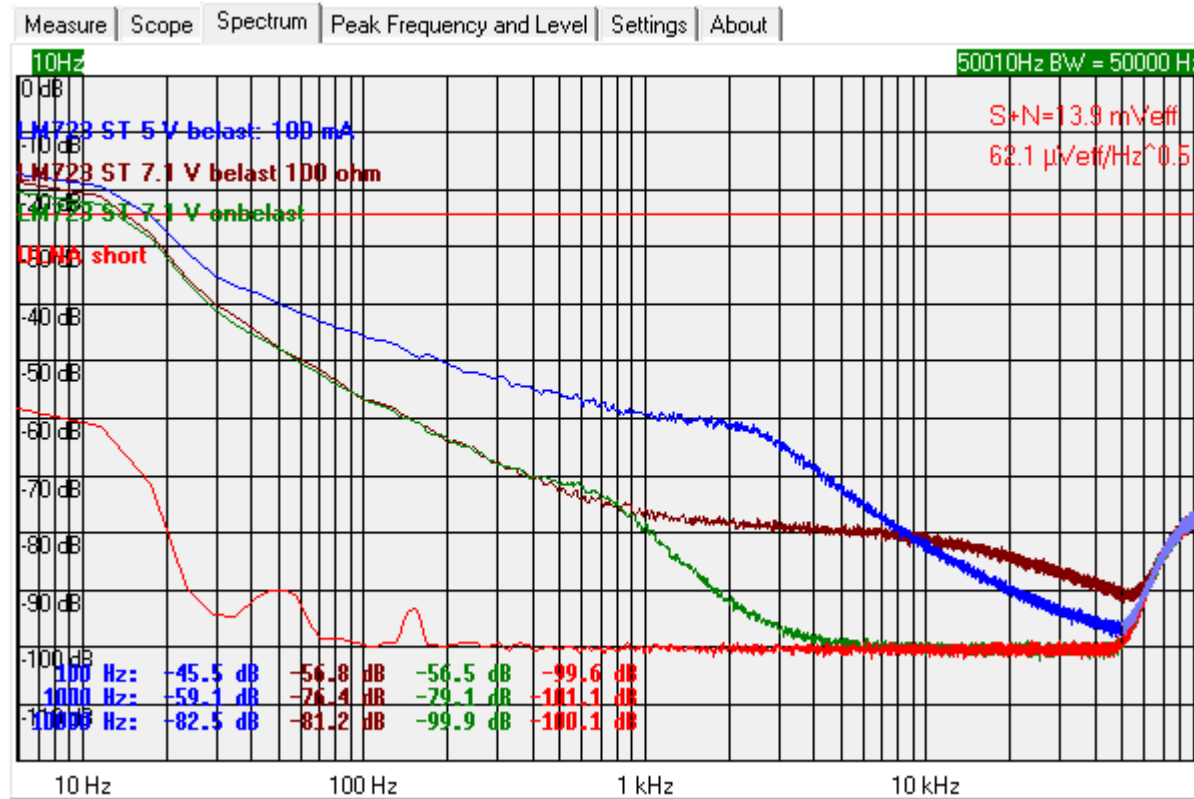
$V_{\text{eff}} = \sqrt{4kTR}$ vul in 1000 ohm: $V_{\text{eff}} = 4,02 \text{ nV}_{\text{eff}} / \sqrt{\text{Hz}}$ (NB: komt goed overeen met meetwaarde!)

Nu de ruisvloer, dat is ingang kortgesloten:

Gemeten werd: $S+N = 155 \text{ nV}_{\text{eff}}$ dit is een spectrale dichtheid van: $0.694 \text{ nV}_{\text{eff}} / \sqrt{\text{Hz}}$

Dit is een uitstekende waarde: de ULNA is goedgekeurd!

De aloude LM723



De rode curve is de kortsluit referentie

De geteste 723 schakeling is van DG4RBF (zie literatuur)

Conclusie LM723

De aloude 723 kan nog best mee.

Bij belasting stijgt de ruis.

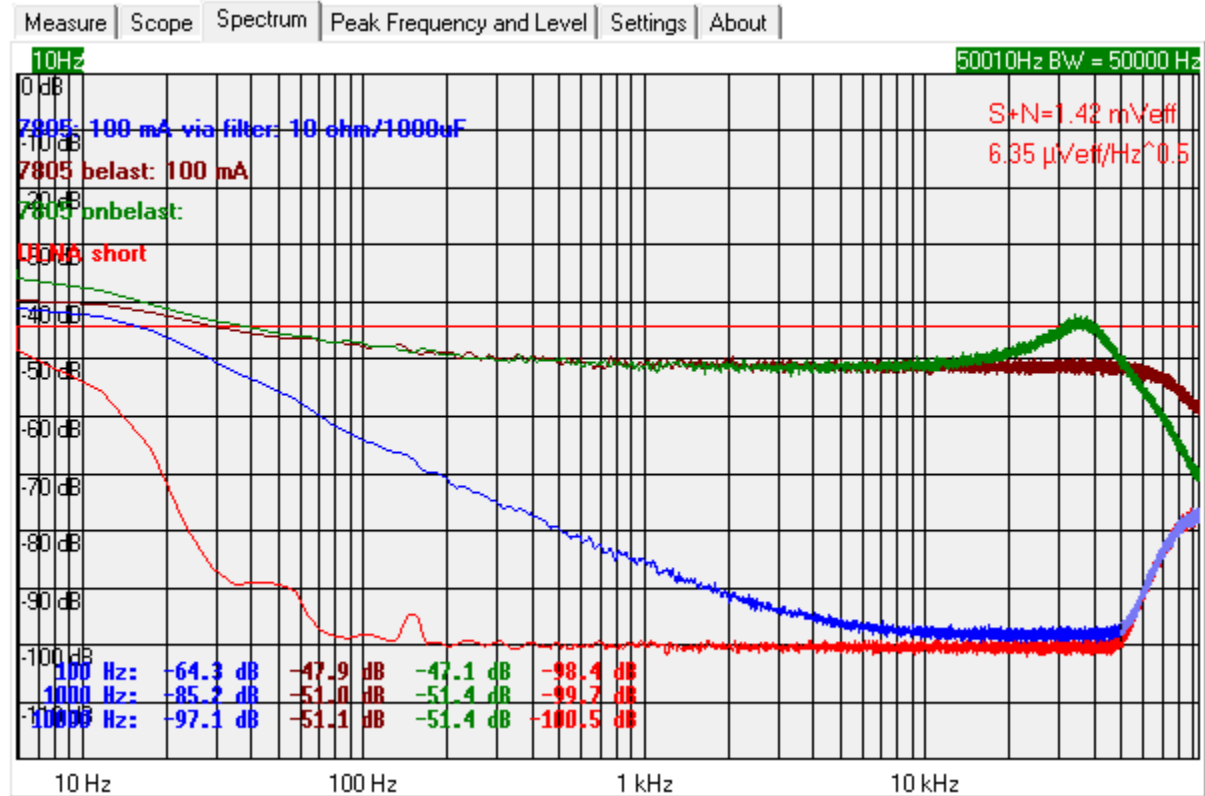
De referentie filteren (niet delen) met R (1 kohm) en goede elko 100 uF // 1 uF keramisch).

Experimenteel bevestigd: de exemplaren van ST Micro geven laagste ruiswaarden.

Voor meer stroom: gebruik een PNP doorlaat transistor

NB: instelpotmeters kunnen behoorlijk ruisen

Driepoot regelaars: 7805



Schakeling volgens datasheet Texas Instruments

Conclusie driepoten

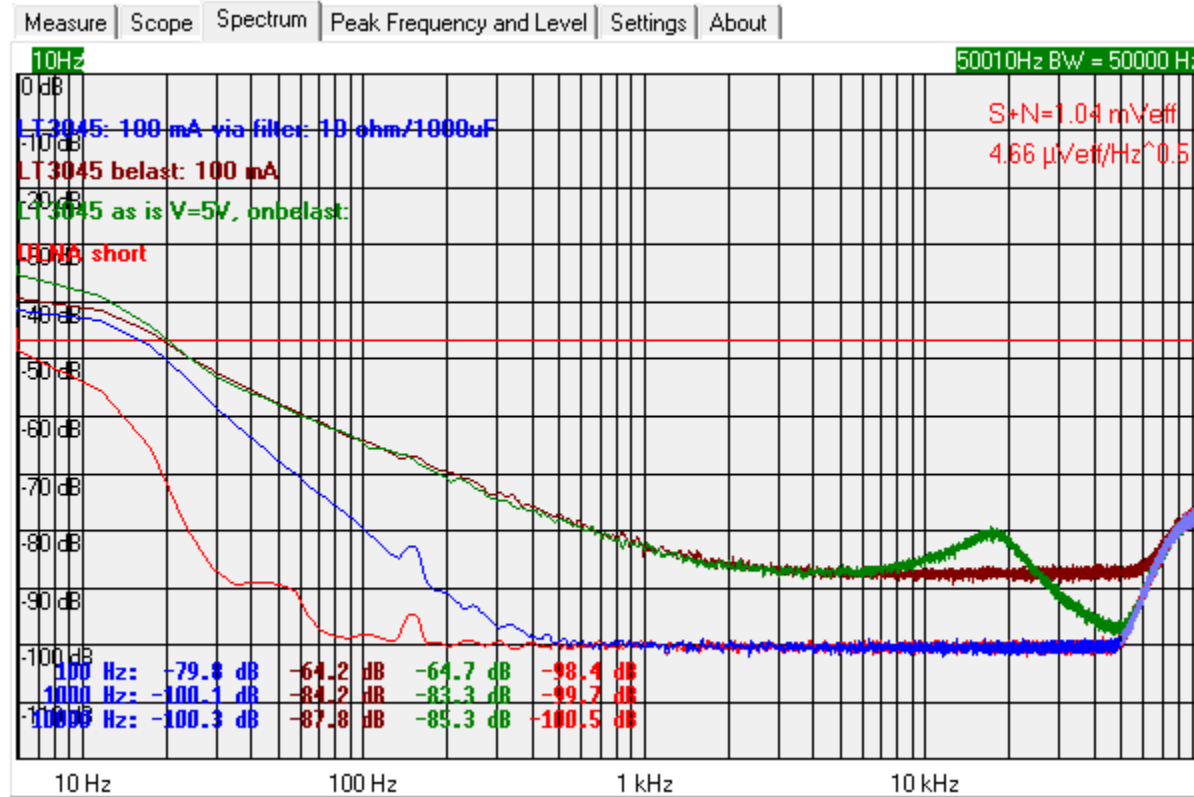
Aanname: de 7805 is exemplarisch voor de 78xx klasse.

Tamelijk veel ruisproductie, niet geschikt voor ruisarme oscillatoren

Rond 35 kHz zelfs een ruisbult in onbelaste toestand, blijkt karakteristiek te zijn.

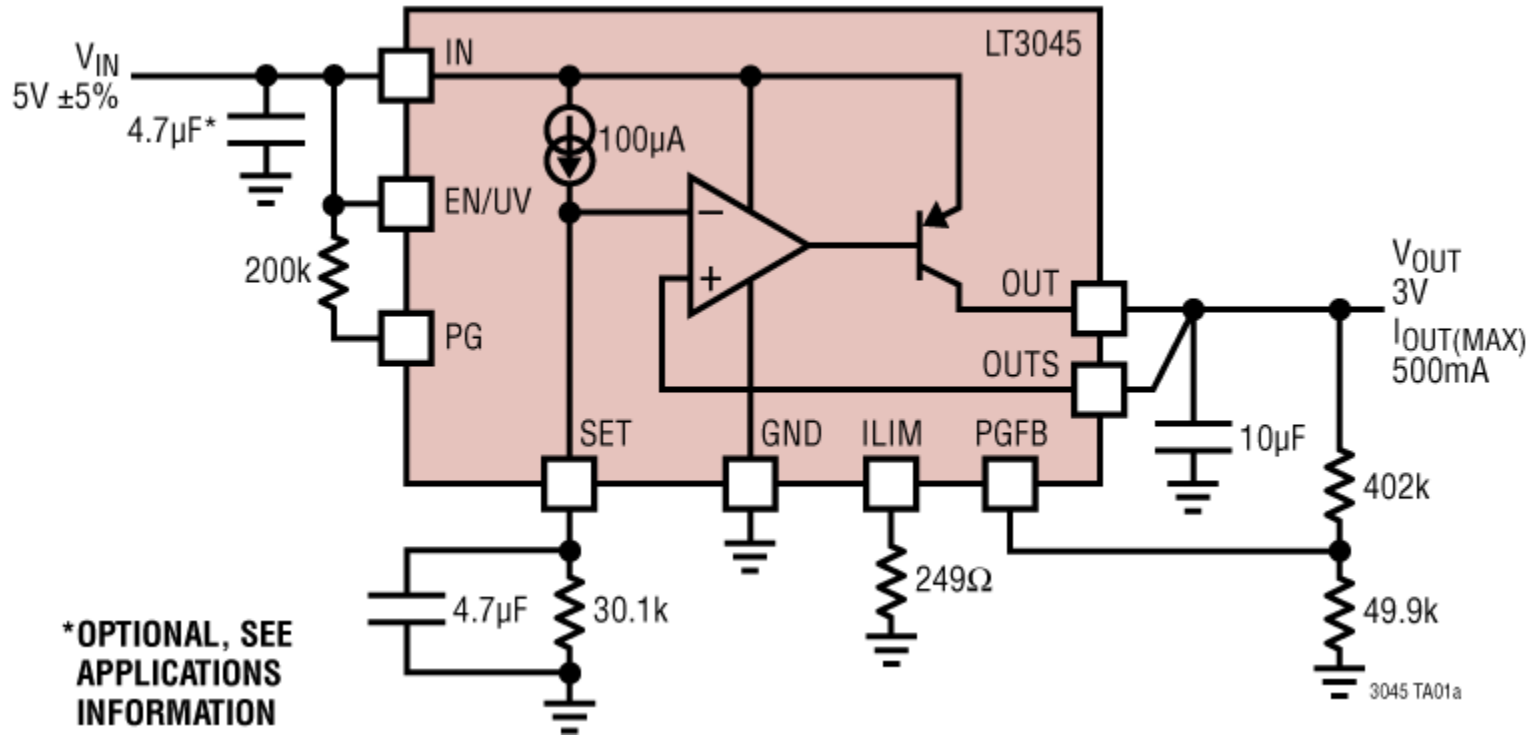
Maar: met een RC filter al veel beter, alleen zinvol bij relatief kleine constante stroomafname.

Moderne ruisarme regelaars



Metingen aan een LT3045 spanningsregelaar in SMD vorm
 Constructie naar DJ8ES

Schema LT3045 (voorbeeld datasheet)



De LT3045 is een LDO regelaar die maximaal 500 mA kan leveren. Uitgangsspanning tot 15 V. 12 pens SMD behuizing.

Conclusie moderne spanningsregelaars

Deze regelaars hebben geen spannings- maar stroomreferentie (100 μ A). Daardoor kan de lusversterking veel lager zijn met als gevolg minder ruisproductie.

Uitsluitend in SMD verkrijgbaar.

Toepassing is niet triviaal, zoals bij een driepoot, raadpleeg datasheet.

In onbelaste toestand een ruisbultje bij plm 18 kHz, al bij een belasting vanaf 5 mA is ie rustig

De laagste ruisproductie zonder filter

Met uitgangsfiler (10 ohm, 1000 μ F) is nauwelijks ruis meetbaar.

Dat is voor kleine oscillatorschakelingen of PLL's geen probleem: daarmee is het probleem van voedingsruis opgelost.

Wat kun je nog meer met een ULNA?

De ULNA is een breedbandversterker die door loopt tot wel 500 kHz.

Je kan hem gebruiken om Grimeton te ontvangen, op 17,2 kHz, vanuit Zweden. Een simpele loop antenne zou moeten volstaan. (Whatsay DW?) Is mij nog niet gelukt, te veel QRM alhier?

Zelfde geldt voor DCF77, de Duitse tijdzender op 77.5 kHz vanuit Mainflingen. Lukte wel met een ferrietantenne.

In beide gevallen moet je de bandbreedte van de spectraal analysator (Audiometer) vrij smal houden.

Andere toepassingen?

Slotbeschouwing

We hebben LF en RF ruisen met elkaar in verband gebracht.

Een ruisarme RF oscillator vereist een goede voedingsschakeling. Wat er verder nodig is om een ruisarme oscillator te bouwen is nu buiten beschouwing gebleven....

Er zijn zeer ruisarme voedingen beschikbaar.

De metingen zijn voor een amateur goed te doen.

Het meten van fundamenteel natuurkundig verschijnsel als de thermische ruis van een weerstand is fascinerend.

Literatuur

1. “Ruis meten van een FET”, Technische Noties van PA3FWM, Electron 03/2026
2. “Rauscharmer 100 MHz VCXO”, Bernd Kaa, DG4RBF, UKW-Berichte 3/2016
3. “Phase Noise Measurement Revisited”, Dennis Sweeney, WA4LPR, and Jim Davey, K8RZ, QEX 2024
4. “AudioMeter-Software zum Messen mit der Soundkarte”, Thomas Baier, DG8SAQ, Funkamateer 10/14
DG4RBF.DE, website van Bernd Kaa, DG4RBF: PNTS, metingen aan een LM723 en de ULNA.
6. “LT3045 Spannungsregler mit sehr geringem Rauschanteil”, Wolfgang Schneider, DJ8ES, UKW-Berichte 2/2021
7. “Rauschmessung an modernen rauscharmen Spannungsreglern”, Bernd Kaa, DG4RBF, UKW-Berichte 3/2021
8. “Rauschspektren von Gleichspannungsversorgungen”, Harke Smits, PA0HRK, UKW-Berichte 4/2022
9. ON4CDU.NET, website van Hans Wagemans, ON4CDU: bevat veel interessante info over microgolf PLL’s en ruismeting aan DC voedingen
10. Keysight.com: bevat zeer veel nuttige en interessante info
11. “Mastering Phase Noise Measurements”, Rohde & Schwarz
12. “The Art of Electronics”, Third Edition, Horowitz and Hill, Cambridge Press, 17th printing 2021: Het Boek dat je eigenlijk moet hebben.....