

Phase Noise Measurement

Der PNTS nach Bernd Kaa, DG4RBF

1 Einleitung

Meine Lieben, heute geht es darum, meine Hausaufgaben zu machen. Immer öfter geht es darum, dass ich mit den modernen Funkgeräten, die ich für die Zeitung testen soll, in manchen Dingen an die Grenzen meiner Messgeräte komme. So beispielsweise gerne bei der IM3-Messung oder die der BDR (Blocking Dynamic Range). Nie kann ich sicher sein, dass ich nicht das Rauschen meiner eigenen Signalgeneratoren messe anstatt das des Prüflings.

Auch in anderen Disziplinen habe ich dieses Problem, beispielweise beim Phasenrauschen. Hier habe ich mich momentan erstmal festgebissen und deshalb beginnen wir erstmal damit.

Als Faustregel mag gelten, dass man gut daran tut, wenn der Signalgenerator eine mindestens um 10dB bessere Rauschperformance als der Prüfling hat. Es gibt schlaue Mathematiker, die einem dann vorrechnen können, dass der Messfehler, den man durch das eigene Phasenrauschen zwangsläufig in den Messwert mit hineinbekommt, stets kleiner bleibt als 0,5dB. Das will ich erstmal als mein Ziel proklamieren. Das zu schaffen, wird keine leichte Übung. Aber wie bei allem im Leben wird der Erfolg umso größer, je schwieriger das Ziel zu erreichen ist. Also los, beginnen wir mal mit einer Internet-Recherche, wie man sowas am Besten angeht.

2 Konzept

Schon nach kurzer Zeit des Lesens stelle ich mal wieder fest, dass sich kaum jemand mit dem Thema "Phasenrauschen" in der Praxis beschäftigt hat. Das ist für mich nicht neu. Normalerweise gibt es immer zwei Lager: die einen, die ein Thema hervorragend mathematisch berechnen und vorhersagen können, aber absolut keine Ahnung davon haben, wie man das messen können sollte; und dann das zweite Lager, das die Messung macht; vielleicht auch kurz anreißt, aber in jedem Fall nur so oberflächlich, dass man selber niemals dahinterkommt, wie genau ich die Messungen nun selber machen sollte und welche Geräte ich dafür brauchte und wie verschalten muss.

In diesem Fall ist es anders.

Ich erkenne nur ein einziges Lager: die Mathematiker!

Ich finde etliche Berechnungen zu Phasennoise-Messungen- aber fast nix aus Lager Nr.2! Nur eine relativ versteckte Seite von Charles Wenzel aus den USA finde ich, der einen Ultra-Low-Noise-Verstärker beschreibt, den man für Phasenmessungen wohl braucht. Von diesem Wenzel-Verstärker werde ich später noch mehr hören- aber das wusste ich bis dahin noch nicht.

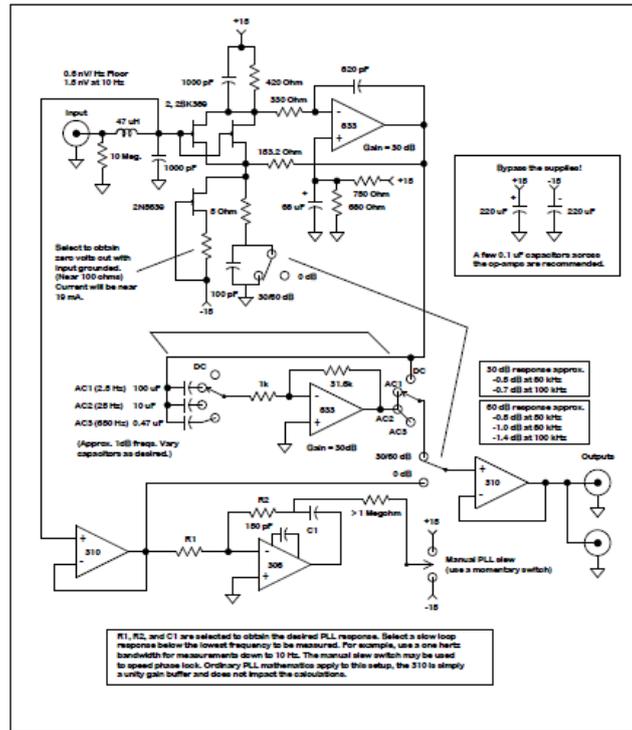


Figure 1: A complete ultra-low noise amplifier and PLL for phase-noise measurements.

Abbildung 1: LowNoise-Amp von Charles Wenzel (Quelle: www.wenzel.com)

Glücklicherweise finde ich dann auch noch eine Seite über ein damals von HP designtes Mess-System, das wahrscheinlich bis heute noch nahezu unangefochtener* Benchmark in der Phasenrauschmessung ist: das HP3048!

Der HP3048 ist eigentlich kein Messgerät, sondern ein 19Zoll-Schrank. Da drin sind ein Haufen verschiedener Messgeräte (z.B. HP11848, HP3561, HP8662), die erst in der richtigen Verschaltung und mit Zuhilfenahme eines HP-Computers zu dem HP3048-System verschmelzen.

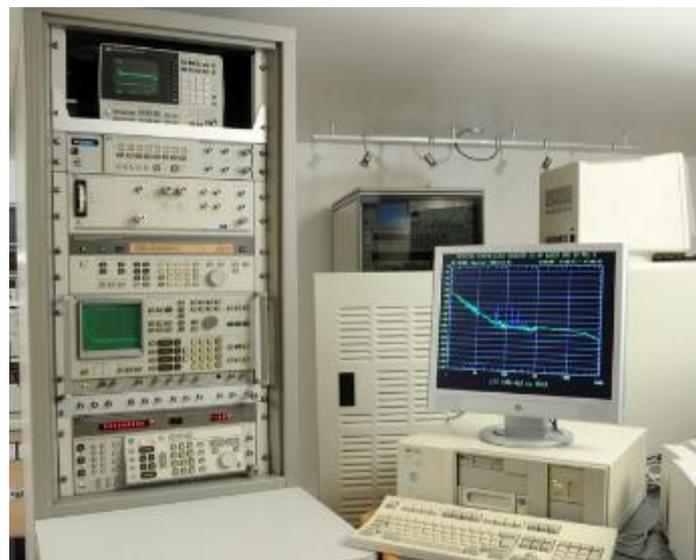


Abbildung 2: HP3048-System (Quelle: www.hpmemoryproject.org)

* derzeit wüsste ich nur den aktuellen R&S FSUP als ersthafte Konkurrenz in dieser Leistungsklasse! Und den von Bernd, aber dazu kommen wir gleich!

Auch wenn mir schnell klar wird, dass ich ein eigenes Phasennoise-Messzimmer neben meinem Bastelzimmer bräuchte, wenn ich ernsthaft in Erwägung zöge, mich in Richtung HP3048 bewegen zu wollen, so lerne ich trotzdem etwas daraus: HP hat zu seinem System damals hervorragende Application-Notes geschrieben, deren Lektüre ich unbedingt empfehle! Daraus lernen wir nämlich, dass die Methoden, die ich bislang für Phasenrausch-Messungen nutzte (Spektrumanalyzer, Modulationsmesser), bereits konzeptmäßig bei Weitem zu unempfindlich sind, um in die richtig geile "Performance-Klasse" aufzusteigen!

Wenn wir also WIRKLICH "so richtig" Phasenrauschen messen wollen, geht das eigentlich nur mit einem empfindlichen Phasendetektor und einem nachgeschalteten (NF-) Analyzer in einer vergleichenden Messung (d.h. wir brauchen eine quasi "rauschfreie" Referenz!; mehr dazu später).



Abbildung 3: Double Balanced Mixer HP10514

Als Phasendetektor wird ein "Double Balanced Mixer" verwendet, den ich mir bei Singer in Aachen bestelle (HP10514). Dieser wird zu einem hervorragenden Phasendetektor, wenn folgende Bedingung eingehalten wird: Prüfsignal und Referenzsignal müssen stets in einem Verhältnis von 90° zueinander stehen. Immer wenn das passiert, kann ein "Double Balanced Mixer" als Phasendetektor verwendet werden und liefert an seinem "IF"-Ausgang ein entsprechendes Signal, das -etwas gefiltert- eine Gleichspannung mit der überlagerten, gesuchten Rausch-NF enthält.

Bei diesbezüglich "nicht ganz so performanten" Generatoren kann man das Rauschen auf der Gleichspannung sogar mit einem Oszilloskop sehen, so beispielsweise sogar bei meinem R&S SMT06!



Abbildung 4: im Versuch vorerst noch breitbandig messen: die Phasenoise-NF

Vorher jedenfalls werde ich den schönen HP10514 durch unbeabsichtigtes Anlegen einer Gleichspannung auf seinen Ausgang gleich wieder killen und weitere 70€ für einen neuen bezahlen müssen, damit ich meine Versuche fortsetzen kann. So ein Ärger!



Abbildung 5: geschrottet: HP10514 von innen

3 Bastelkreis

Und dann passiert etwas Unerwartetes.

Dietmar DL2ZBE schreibt mich an. Dietmar kenne ich vom INTERRADIO Funkmessplatz und war stets ein gern gesehener und zuverlässiger Besucher.

Während eines lockeren email-Chats eher zufällig mit dem Begriff "Phasenoise" gefüttert, spuckt Dietmar sofort den Kontakt zu einer kleinen Gruppe Funkamateure aus, die sich ganz nüchtern "Bastelkreis" nennen. Und ab diesem Zeitpunkt werde ich nur noch sprachlos. Nach nur wenigen Minuten Beschäftigung mit diesem Bastelkreis erkenne ich sofort:

Leute, ich bin ja ein so kleines Licht!

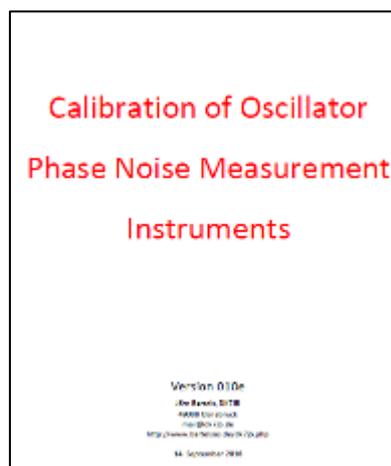


Abbildung 6: Eins der vielen Dokumente von Jörn, DK7JB (Quelle:www.bartellos.de)

Ein SOOOOOOOOOOOOOOOOOOO kleines Licht!!!!!!

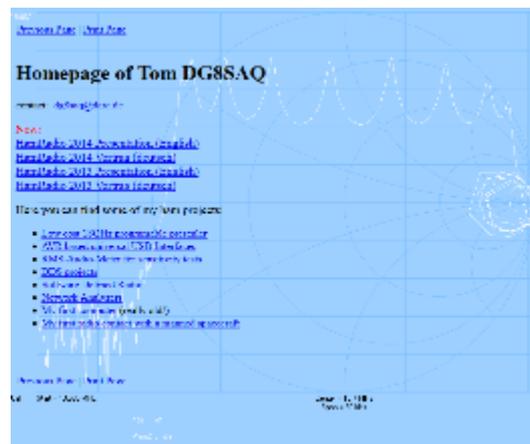
4 Phasenoise und Prominenz

Sofort nimmt sich der Bastelkreis meines Themas an und mir gefriert das Blut in den Adern, als ich lerne, wer sich hier alles herumtreibt und was hier schon an Ergebnissen und Forschungen stattgefunden hat. Nicht nur Universitätsprofessoren arbeiten hier mit, sondern Gewinner von Entwicklungswettbewerben und Dozenten von Vortragsreihen. Mehr noch: Bernd Kaa, DG4RBF, hat bereits ein komplettes Phasenoise-Testsystem entwickelt und evaluiert(!). Und noch besser: sogar den fertigen Platinensatz kann man -zum Selbstkostenpreis- bei ihm erwerben, wie geil ist das denn!



Abbildung 7: PNTS von Bernd Raa, DG4RBF (Quelle: www.dg4rbf.de)

Sofort verschlinge ich die Dokumentation und nehme befriedigt zur Kenntnis, dass es zu diesem Thema offensichtlich *doch* nicht nur die Mathematiker gibt! Bernd ist einer der ganz, ganz wenigen, die bei ihren Themen wirklich "Ross und Reiter" nennen, genau erklären, wie was und warum gemacht wird und -Achtung!- hinterfragt es sogar! So wundert es nicht, dass bei seinen Projekten Messkurven beiliegen, die sein Phasenrausch-Testsystem (er nennt es "PNTS") mit einem absolut superprofessionellen Rohde&Schwarz FSUP und einem Agilent Signal Analyzer im direkten Vergleich zeigen und ihm eine absolut tolle Übereinstimmung attestieren. Ein weiteres Bastelkreis-Mitglied, das den PNTS ebenfalls nachgebaut hat, schickte einen Quarz Test-Oszillator zum Ausmessen keinem geringeren als Prof. Dr. Ulrich Rohde himself, der ihn höchstpersönlich an seinem eigenen FSUP durchgemessen und samt Messergebnissen zurückgeschickt hat.



5 Konzentration, bitte!

Ich brauche ein paar Tage, um wieder "runterzukommen" und mich auf das Wesentliche konzentrieren zu können: auf die Phasenrausch-Messung! Während ich das Konzept des Phasenrauschmessplatzes von Bernd genau studiere, bemerke ich Ähnlichkeiten mit dem Wenzel-Verstärker und dem analogen Eingangsteil des Rohde&Schwarz UPL Audioanalyzers! Erste war gewollt, die zweite nicht, so versichert mir Bernd :-)

Überhaupt macht mir die Dokumentation über den PNTS sehr viel Freude. Genau so (oder so ähnlich) hätte ich es auch gemacht. Und um ehrlich zu sein: ich hatte bereits mit dem Eingeben eines Schaltplans und dem Routen einer Platine begonnen. Und mein Ansatz war sogar sehr ähnlich. Logisch- denn auch ich bin von dem Wenzel-Verstärker ausgegangen, denn das ist ja das Einzige, was man bislang zu dem Thema "Phasenrauschen Selbstbau" im Netz findet. Beziehungsweise das, was ICH fand. Hätte ich man gleich die richtigen Sachen gelesen (z.B. Scripte der Weinheimer UKW-Tagung), hätte ich keinen solchen "Umweg" gebraucht, um auf den richtigen Track zu kommen.

Ich bestelle sofort den PNTS Platinensatz, der aus drei Leiterplatten besteht: der Hauptplatte, der "Quadraturlupe" und dem besonders rauscharmen Netzteil (mit einem LM723).

Das Tolle an diesem Konzept ist, dass sein Entwickler wirklich nahezu jede einzelne Komponente hinsichtlich des Beitrages zum NoiseFloor untersucht und optimiert hat. Diese Leistung kann man gar nicht genug würdigen und ist meiner Meinung nach ein Paradebeispiel für korrektes, ingenieurmäßiges Arbeiten. Dass ich zugegeben heutzutage immer öfter vermisse, denn beim Benutzen heutiger Consumer-Elektronik bin ich manchmal fassungslos, wie "hingehuscht" (manche Entwicklungen verdienen sogar das Wort "hingepfuscht") hier elektrisches, mechanisches -und vor allem- Systemdesign betrieben wird! Die Beschreibung zum PNTS zu lesen, ist hingegen Balsam auf alle diese Wunden. Endlich mal jemand, der wirklich in systematischer Art und Weise eine Entwicklung betrieben, verifiziert und optimiert hat. Ihr seht schon, ich kann gar nicht genug des Lobes sein!

Einen Kritikpunkt sehe ich aber doch: beim Aufbau der Platine werde ich so manches graues Haar lassen. Bernds Layout ist so dermaßen eng gemacht, dass es keinerlei Variationen von Bauteilen verzeiht. Ein bereits für die höhere Spannungskategorie "falsch" bestellter Elko passt bereits nicht mehr auf die Platine, weil er ein paar Millimeter im Durchmesser breiter ist als sein Bruder und an andere Komponenten anstößt. Die bedrahteten Widerstände müssen so eng abgewinkelt werden, wie es nur irgendwie geht. Trotzdem muss ich zwei oder drei hochkant einlöten, weil ich sie sonst einfach nicht zwischen die Löcher gesteckt kriegen (mit einer kleineren Bauform wär's gegangen, aber die hatte ich nicht in der Bastelkiste). Sicher hat Bernd -auf der Jagd nach dem letzten dB- auch das Layout nicht dem Zufall überlassen. Höchstwahrscheinlich ist diese Kompaktheit einfach der Preis, um für vagabundierende Störungen so wenig Angriffsfläche wie möglich zu bieten. Denn bedenke, dass wir uns bei einem Noiselevel bei <170dB unter dem Träger absolut im physikalischen Grenzbereich bewegen!

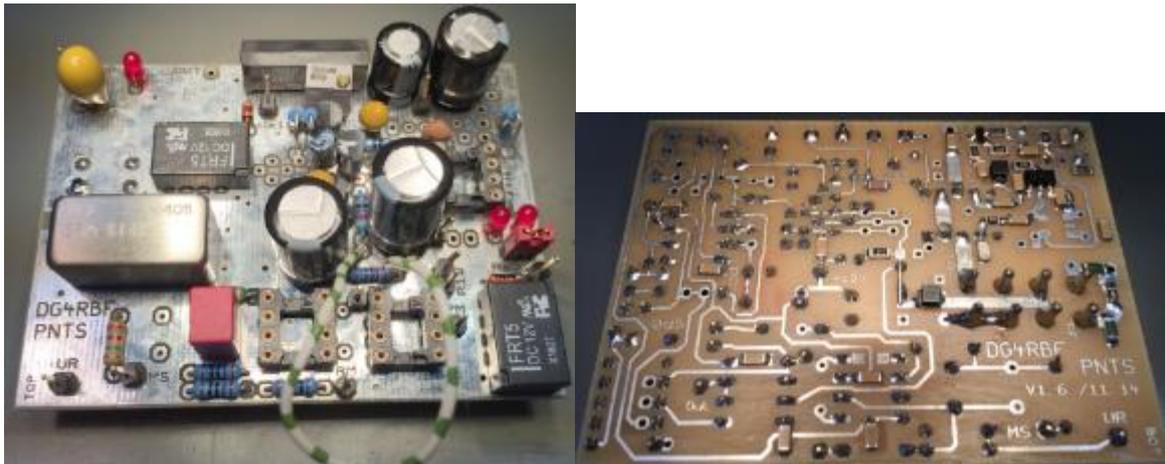


Abbildung 9: PNTS Hauptplatine (Zwischenstand)

Trotzdem: diese Platine ist nichts für Anfänger und sicherlich eine der kniffligsten, die ich je bestückt habe. Die SMD-Bauteile auf der Unterseite komplettieren den Schwierigkeitsgrad.

Interessanterweise vergleichsweise einfach fand ich dabei das Wickeln des Übertragers. Ich weiß, so etwas schreckt viele ab. Muss es aber nicht, denn es ist wirklich nicht schwer! Alles, was man dazu braucht, ist ein N30 Doppellochkern (erhältlich bei Bürklin) und 0,2mm Kupferlackdraht. Hier habe ich den eines alten Netztrafos genommen- ganz unkompliziert und einfach.

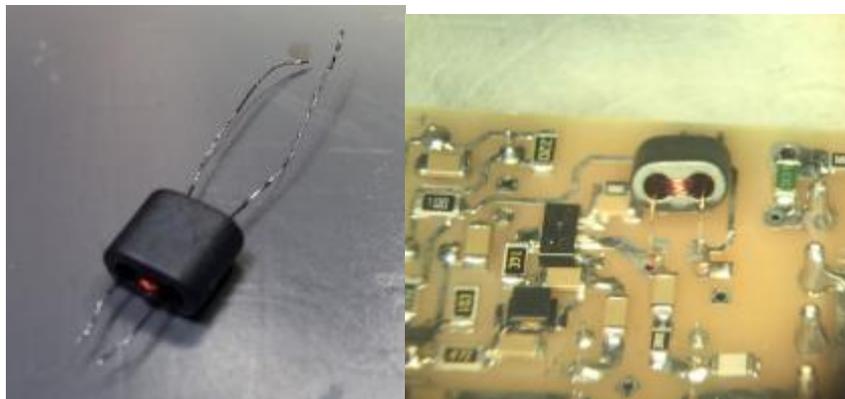


Abbildung 10: der fertig gewickelte Trafo bei Herstellung (links) und beim Einlöten (rechts)

Bernd hat das Wickeln so anschaulich beschrieben, das es sogar mir -als Trafowickelanfängerneuling- auf Antrieb gelang. Ich habe gleich zwei Stück hergestellt- auch mit bewusst aus unterschiedlicher Quelle stammenden 0,2mm Drähten. Ich war erstaunt, wie gering die Abweichungen zueinander waren. Wenn man den gewickelten Übertrager auf der Primärseite misst, habe ich ca. $6,8\mu\text{H}$ mit $R_s = 0,03\text{Ohm}$ erhalten (Sekundärseite im Leerlauf); auf der Sekundärseite hatte ich $272\mu\text{H}$, $R_s = 0,137\text{Ohm}$ (Primärseite im Leerlauf). Messfrequenz 1kHz, L seriell, HP4284A mit Kelvin-Klemmen gemessen.



Abbildung 11: Trafo gemessen

Den Trafo selber habe ich übrigens nach dem Auflöten mit je einem Tropfen Uhu Kraftkleber auf der Platine gesichert- da wir uns hier ja bei Frequenzen weit unterhalb 1GHz bewegen, muss man da HF-technisch noch nicht so aufpassen und keinen extra HF-tauglichen Klebstoff einsetzen.

6 Transistoren ausmessen

Die Transistoren, die im NF-Zweig sitzen, sind zwei parallel geschaltete 2SK369. Nachdem ich 10 Stück von Reichelt bestellt hatte, riet man mir zur Selektion, da FETs in ihren Kennlinien sehr stark streuten und es hier auf möglichst guten Gleichlauf ankäme. Aber- wie genau macht man das? Transistoren selektieren?? Noch nie gemacht!

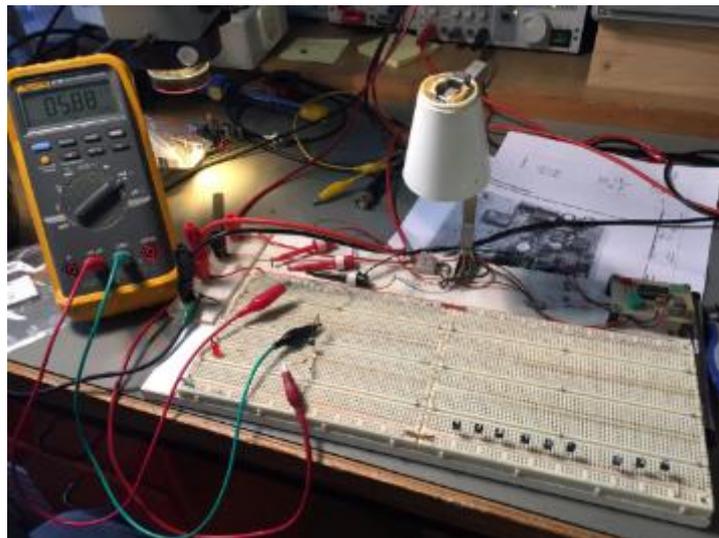


Abbildung 12: Transistor im Steckfeld von Opa Kurt

Also überlege ich mir kurz einen geeigneten Aufbau und krame das alte Steckbrett meines Opas heraus. Die Prüflinge werden hier an eine 10Volt-Spannung (mit 20mA Strombegrenzung) angeschlossen und ein 100Ohm-Widerstand in die Drain-Leitung gehängt. In die Gate-Leitung stecke ich 47Angst-Ohm. So verdrahtet, bilde ich die Prüfbedingungen aus dem Datenblatt des 2SK369 ganz gut nach und kann damit so schief eigentlich nicht liegen. Ein eingeschleiftes mA-Meter zeigt mir den fließenden Strom an; ein Multimeter zeigt mir die Gate-Spannung. Dank des Steckbrettes meines Opas kann ich die Transistoren innerhalb weniger Sekunden untereinander austauschen, deren individuelle UGs/IDS Kennlinie aufnehmen und miteinander vergleichen.

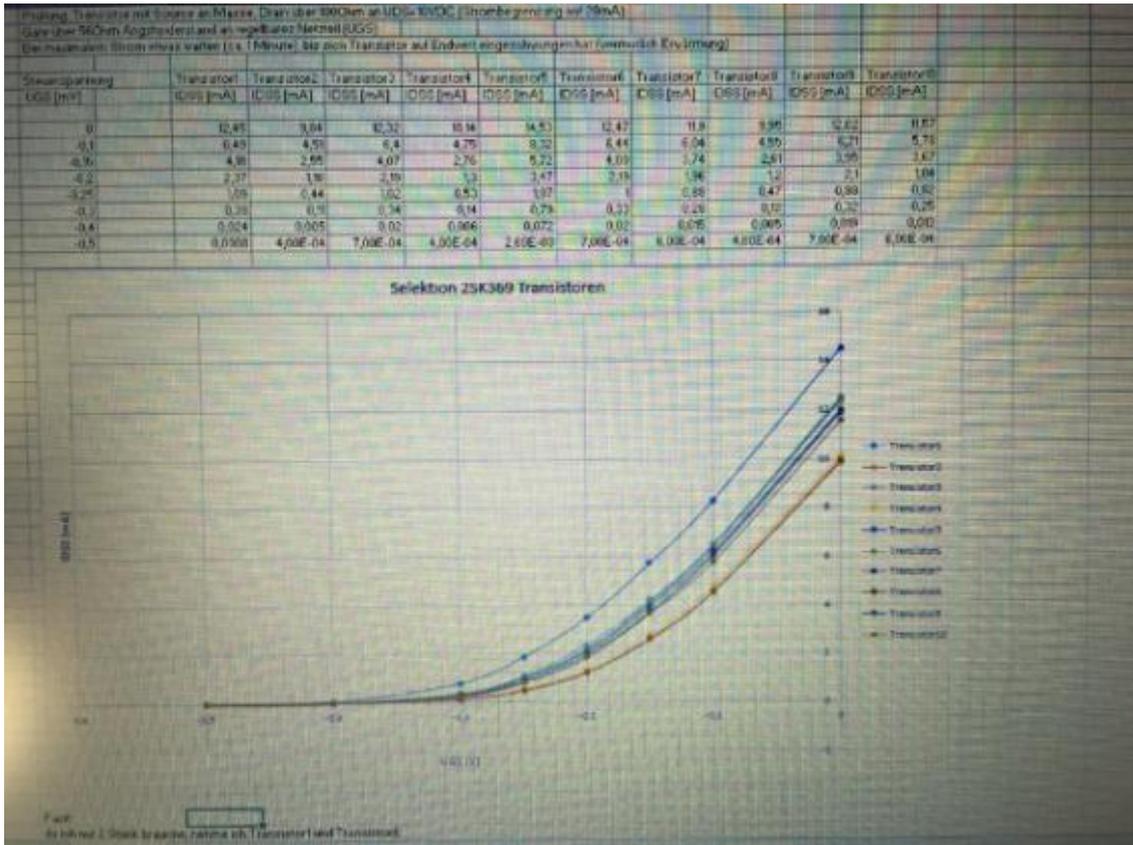


Abbildung 13: Transistor-Kennlinien (sorry für das schlechte Bildschirm-Foto, es ist das einzige, das ich habe- die Original-Datei hat mein Computer irgendwie nicht gespeichert)

Bei 0Volt Gatespannung hat ein N-Kanal-FET üblicherweise einen sehr geringen Widerstand- folglich fließt hier der maximale Strom. Je negativer man nun die Gate-Spannung gegenüber Source macht, desto mehr wird der Elektronenfluss im Drain-Source-Kanal gebremst, und umso höher wird sein Widerstand.

Es ergibt sich nach der Untersuchung von 10 Transistoren folgendes Bild:

Ich wähle am Ende Transistor Nr.1 und Nr.6 aus und löte sie sein.

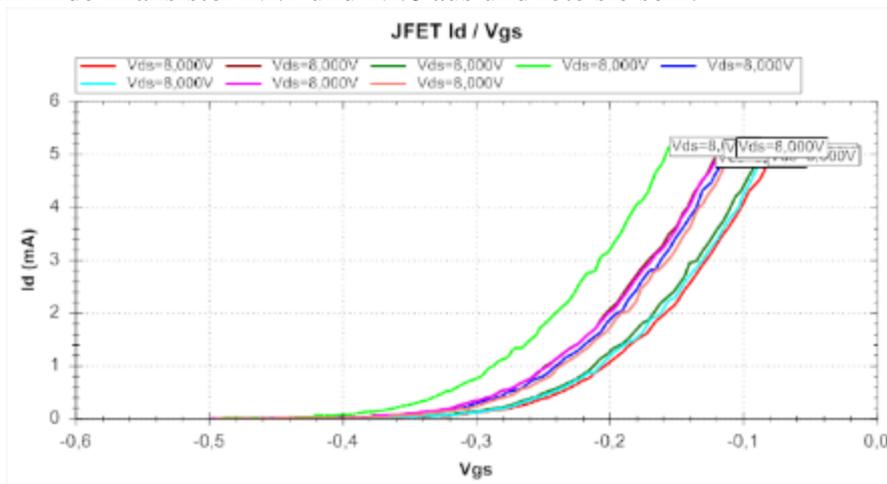


Abbildung 14: dieselbe Messung- diesmal aber mit dem Peaktech DCA75, den mir der Weihnachtsmann zwischenzeitlich brachte :-)

7 Inbetriebnahme der PNTS-Platine

Bekanntlich ernährt sich das Eichhörnchen mühsam, und so werde ich doch irgendwann mit der Bestückung der Platine fertig. Doch bevor ich sie in ein Gehäuse einbaue, will ich sie natürlich testen. Mein Test beginnt mit dem Einschalten der Netzteile mit den +/-12Volt. Kein Rauch, Stromaufnahme <100mA, das ist schonmal gut. Ich will mal wissen, ob der LowNoise-Amp funktioniert. Dazu muss ich jedoch erst den Abgleich von R8 und R18 machen- und da war tatsächlich die einzige Stelle, an der ich Bernd's Beschreibung gern ergänzen möchte.

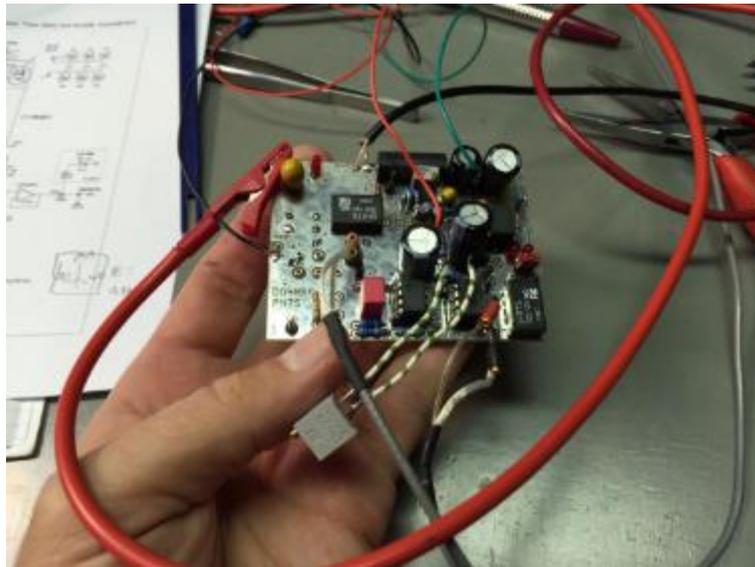


Abbildung 15: erste Inbetriebnahme (man sieht den angelöteten R8)

Ich bin so vorgegangen (und ich glaube, so war es auch gemeint):

1. anstelle R8 einen 2kOhm Spindentrimmer einlöten
2. Relais Re1 bestromen ($v=60\text{dB}$) => Stromquelle BF246 mit R18 bleibt erstmal inaktiv
3. nun mit R8 so justieren, dass an TP1 ca. 0Volt anliegen
4. Re1 wieder abklemmen ($v=30\text{dB}$) => Stromquelle BF246 wird aktiv, Spannung an TP1 ändert sich
5. nun mit R18 ebenfalls auf $\sim 0\text{V}$ an TP1 abgleichen

Die Schritte 2-5 zur Kontrolle mehrmals wiederholen, ob Abgleich auch stabil ist

6. R8 Spindeltrimmer auslöten, mit genauem Widerstandsmesser ausmessen, R8 durch Festwiderstände nachbilden und einlöten
7. Arbeitspunkte an TP1 nochmals überprüfen, bzw. verifizieren

Nachdem ich das gemacht hatte, habe ich die Frequenzgänge in den drei Stellungen "0dB", "30dB" und "60dB" überprüft. Dazu habe ich den Mischer herausgezogen und über einen $10\mu\text{F}$ Elko die NF meines Audioanalyzers in den Pin "IF"-Port eingespeist. Bei $f=1\text{kHz}$ hatte ich die Verstärkung ausgemessen:

0dB: +0,058dB
+30dB: +30,29dB
+60dB: +59,73dB

Das sieht doch schonmal gut aus!

Also dann weiter. Gucken wir uns den HF-Verstärker an. Der ist zwar auf der Hauptplatine mit drauf, aber wirklich separat und unabhängig vom Rest prüfbar. Er wird aktiviert, indem man den AMP-Eingang mit +12V bestromt. Ich messe den Strom und stutze etwas- mit über 100mA ist das deutlich zu viel, denn die Anleitung redet von 55mA! Der Netzwerkanalysator bescheinigt zwar eine gute Funktion (ca. +8dB@100MHz), aber die Wärmebildkamera misst tatsächlich +82°C im Hotspot des verstärkenden Haupttransistors (NE46134)- das ist ganz schön warm!



Abbildung 16: Wärmebild vorher

Bernd schaltet sich ein und misst mit seinem Infrarotthermometer bei sich etwa 40°C an seiner eigenen Schaltung. Ich prüfe daraufhin bei mir die Arbeitspunkte nach und stelle fest: stimmen bei mir nicht! Es dauert nicht lange, da identifiziere ich eine verkehrt herum eingelötete LED in der Nähe des BC857 als Ursache. Ich schlage Bernd vor, bei späteren Layoutänderungen ein kleines "+" an der Anode der LED vorzusehen, drehe die LED bei mir um und messe nun 69mA als Stromaufnahme (inkl. Umschaltrelais)- das kommt hin. Und der gemessene Spannungsabfall am 39Ohm-Emitterwiderstand des NE46134 zeugt von einem Emitterstrom von exakt 56mA- so soll es sein!

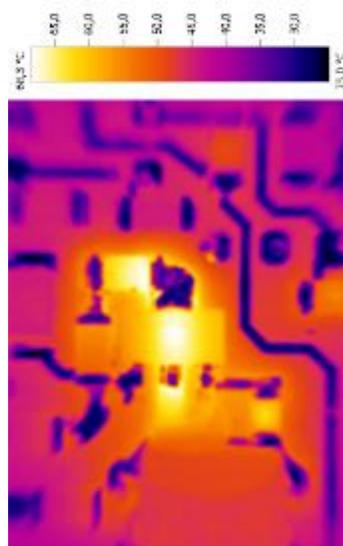


Abbildung 17: Wärmebild nachher (90° gedreht)

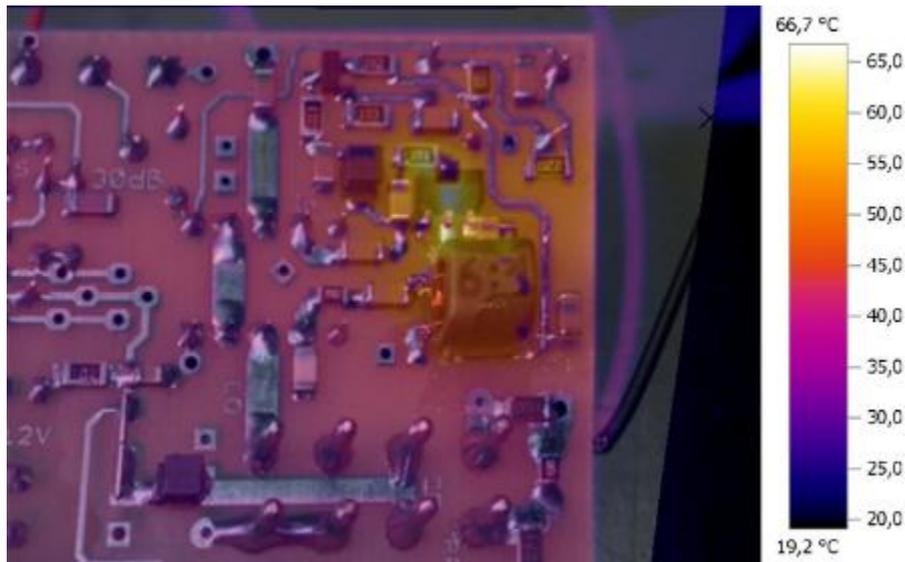


Abbildung 18: Overlay von Real- und Wärmebild

Der Hotspot im NE46134 sinkt laut Wärmebildkamera folglich von vorher 82°C auf 68°C und selbst das IR-Thermometer misst (aufgrund der größeren Messfläche, die es ausmittelt) 43,5°C. Das passt gut zu Bernd gemessenen Werten und auch das S21 (=Verstärkung), das der Netzwerkanalysator ausspuckt, macht keinen Anlass zur Sorge.



Abbildung 19: nochmalige Überprüfung mit dem IR-Thermometer

Den liefert jedoch wenige Sekunden später der Jüngste der Familie. Dieser hat nämlich zwischenzeitlich Papas 84teiliges SMD-Kondensatorsortiment vom Tisch gegrabelt und freut sich über die vielen, lustigen Klappen, unter denen man Bergeweise SMD-Kondensatoren zum Anstaunen findet.



Abbildung 20: Nachtigall, ick hör Dir trapsen- mein SMD-Kondensatorsortiment

Ihr ahnt, was jetzt kommt.

Wenige Sekunden später sind die vielen SMD-Berge auf der "anderen Seite" der Klappen- nämlich auf dem Fußboden.



Abbildung 21: nein, das ist kein "Dreck" auf dem Fußboden, sondern etwa 3/4tel meines gesamten SMD-Kondensatorbestands

Hunderte (tausende?) SMD-Kondensatoren unterschiedlichster E24-Werte liegen nun dort bunt verstreut vor mir und das war einer dieser Momente, in denen ich tatsächlich kurz meine Contenance verloren habe. Ein heulend aus dem Zimmer und die Treppe herauflaufender Sohn, eine kopfüber gestürzte Sortimentsbox mit sperrangelweit geöffneten Türchen (fast wie bei Advent), ein wertlos gewordener SMD-Berg mit einem Stückpreis von etwa 4cent pro Bauteil und ein nahezu ohnmächtig frustrierter Vater, der seinen Augen kaum traut, sich erstmal setzen muss und dabei verzweifelt eine UNDO-Taste am Labortisch sucht.

Es hilft aber nichts, der Staubsauger frisst schließlich sämtliche SMD-Bauteile, die in Summe nahezu seinem Eigenwert entsprechen und ich versuche zu retten, was noch zu retten ist. Der Sohn presst auf Druck von Mama auf ihrem tröstenden Arm ein doch sehr gequält klingendes und wenig überzeugendes "tschuldigung!" heraus und lässt sich anschließend von mir die Tränen aus dem Gesicht wischen. Die habe ich auch fast, aber ich mache mir bewusst, dass ein Unfall im Straßenverkehr oder ein durch einen rutschigen Bürgerstein gebrochenes Bein doch weitaus schlimmer wären, also nehme ich mein Schicksal wie ein Mann. Zumindest versuche ich es, denn ein über Jahre zusammenge"amazontes" SMD-Sortiment in dieser Größenordnung (und Qualität!) kauft man nicht einmal so an der nächsten Straßenecke nach und das wurmt mich doch mehr, als ich zugeben will. Rückschläge gehören aber zum Leben mit dazu. Es dauert tatsächlich einige Tage, bis ich den Frust überwunden habe.



Abbildung 22: ...kann man ihm da wirklich lange böse sein? :-/

8 Beengter Aufbau

Während der Bestückung machte mir die Enge ja schon etwas zu schaffen. Ähnlich erging es mir mit dem empfohlenen Gehäuse. Weil die "Nummer größer" leider bei Conrad derzeit nicht lieferbar war, mir das schicke Design aus Bernds Beschreibung aber sehr gefiel, habe ich dieselbe Größe genommen wie in der Anleitung vorgeschlagen. Und das bereue ich nun zunehmend, denn ich wollte mit dem Frontplattendesign ganz gern etwas variieren; für die Verstärkung des NF-Amps beispielsweise einen Drehschalter einsetzen (0/30/60dB) statt der zwei separaten Kippschalter; als Anzeige der PLL-Spannung hatte ich mir sogar extra ein analoges +/-50mA Drehspulinstrument mit Mittelstellung gekauft, das ich aber nun aus Platzmangel auch nicht einsetzen kann.



Abbildung 23: sieht groß aus, wird aber trotzdem eng: die Hülle für die PNTS-Platine

Das Design der Frontplatte mit dem millimeterweisen Verrücken der Bedienelemente, bis endlich nichts mehr aneinander anstößt, kostet mich Ewigkeiten und wäre auf einer größeren Frontplatte viel leichter gewesen. Ich muss letztendlich sogar den Ein-Ausschalter in meinen Drehschalter integrieren, denn ich kriege sonst einfach keinen weiteren mehr drauf. Auch die Buchse für die Phasenoise-NF muss ich auf die Rückseite verlegen. So ein "ausgeknautschtes" Design habe ich bislang wirklich selten gesehen.

Die Anschlussbuchsen werden als SMA-Buchsen ausgeführt, denn erstmal nähme BNC zu viel Platz ein und zweitens befürchten wir, dass die BNC-Verbindung kein so gutes Schirmungsmaß gegenüber Störungen bieten könnte wie SMA.

Das Design im Innern ist aber auch nicht wesentlich geräumiger. Die Hauptplatine wird in ein kleines Alu-Druckguss-Gehäuse eingesetzt und mit einer 15poligen D-Sub-Buchse steckbar gemacht. Die mechanische Befestigung löse ich mit Lötösen, die die Leiterplatte im Innern fixieren. Die Isolierung nach unten übernimmt eine einfache Kunststoffplatte, die ich mit Teppichklebeband in den Boden des Gehäuses geklebt habe.

Die Verdrahtung im Innern erfolgt -wie sollte es auch anders sein- ebenfalls unter beengten Platzverhältnissen. Am Ende hoffe ich, dass ich diese Platine nie mehr werde ausbauen müssen, denn das wäre echt aufwändig*.

Egal, geschafft ist geschafft und ich kann mich nun um andere Dinge kümmern. Beispielsweise um den Aufbau der Netzteilplatine für den rauscharmen LM723, der Bernds Platinensatz beiliegt.

* muss ich doch, aber lest weiter! :-(((

9 Anfertigen der Frontplatte

Nachdem die Lage aller Bedienelemente festgelegt ist, mache ich mir eine Zeichnung. Nennt mich etwas "oldschool", aber ich mache das meistens mit Microsoft Powerpoint. Im Raster 0,1mm male ich mir Rechtecke, Kreise, Kästchen und Textfelder und richte mir so die ganzen Elemente so zurecht, bis ich zufrieden bin. Die so erstellte "Zeichnung" drucke ich aus und dient mir dann als Vorlage beim Höhenanreißer.



Abbildung 24: Frontplattendruck auf Papier als Vorlage

Danach geht es auf die Fräse und mit einem schnell laufenden 4mm-Fräser erzeuge ich die Ausschnitte für das DVM-Modul und die Quadratlupen in der Frontplatte.

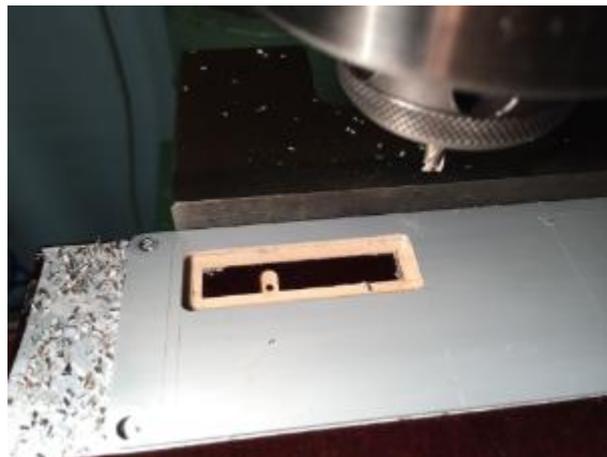


Abbildung 25: Fräsen des Ausschnitts für das Messinstrument

Auch wenn ich sowas nie wirklich gelernt habe und es deshalb alle Mechaniker von Euch vermutlich schon Nackenschmerzen haben vom vielen Kopfschütteln, bin ich mit dem Ergebnis doch schon sehr zufrieden. Danach bohre ich mit einer kleinen, schnelllaufenden Standbohrmaschine die ganzen Löcher für LEDs, Schalter und Potis.



Abbildung 26: Löcher in die Frontplatte bohren

Dann werden die Bauteile alle probeweise einmal eingeschraubt. Ja- passt!



Abbildung 27: wird doch ganz gut!

Die so generierte Frontplatte lege ich auf meinen Scanner. Das so gescannte "Foto" lege ich als halbtransparentes Foto hinter meine Powerpoint-Zeichnung und ziehe alle Textfelder, Schalter und Grafikobjekte so hin, dass sich die Konturen zwischen Foto und meiner Zeichnung exakt überdecken.

Dann lösche ich die Führungslinien, und alles das, was ich später auf meiner Frontplattenbeschriftung nicht brauche, heraus und rücke die Beschriftungen anhand des Hintergrundfotos richtig zurecht.

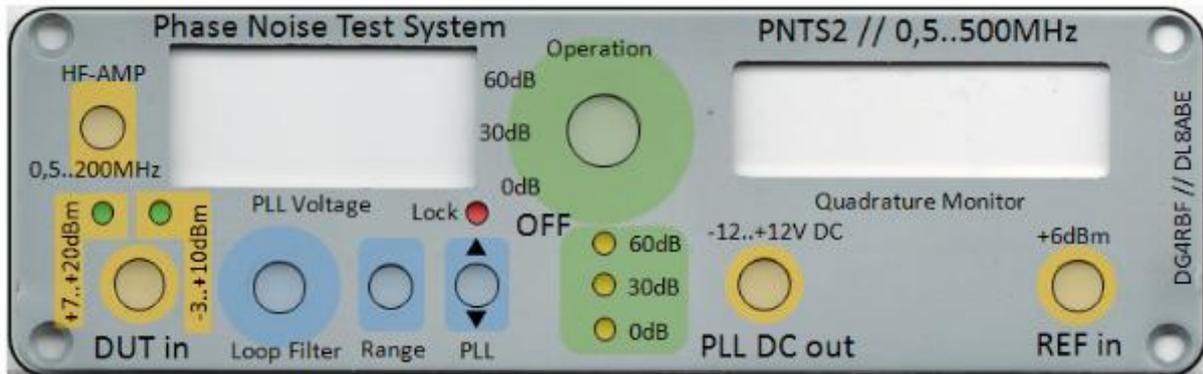


Abbildung 28: Frontplattenlayout



Abbildung 29: Frontblende von hinten- jau, passt alles

Wenn alles stimmt, wird das Bild auf eine transparente, selbstklebende Folie gedruckt und dann ganz sauber und langsam auf die gebohrte und gefräste Frontplatte aufgeklebt. Fertig ist die Beschriftung!

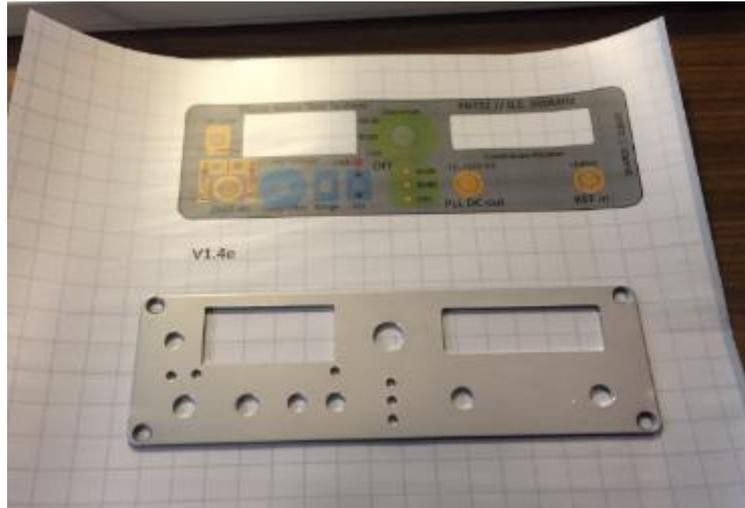


Abbildung 30: auf Folie gedruckte Frontplattenbeschriftung zum Aufkleben

Wer mag, kann nun noch Klarlack draufsprühen, damit der Druck sich nicht so schnell wieder abwischt. Je nach Folie und verwendetem Drucker (Drucktechnologie) kann das natürlich variieren. Aber wir sind hier ja im Hobby unterwegs, also bitte die Ansprüche etwas herunterschrauben. Trotzdem bin ich auf meine Frontplatte eigentlich ziemlich stolz:

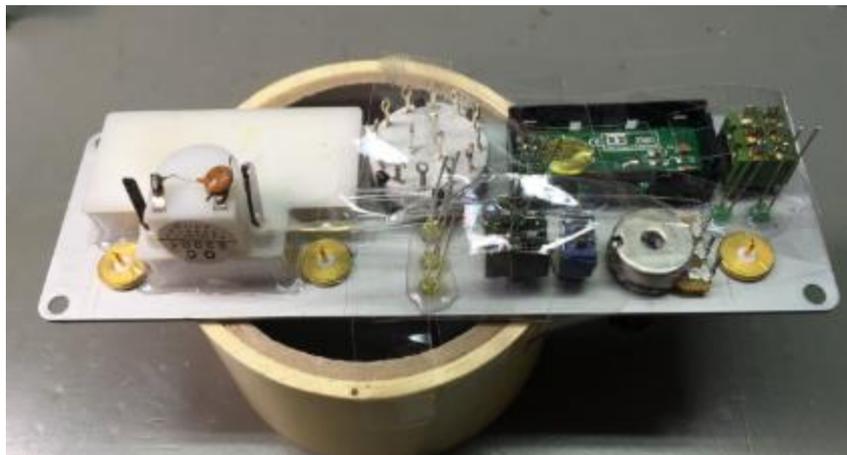


Abbildung 31: LEDs werden von hinten eingeklebt

Bedenke, dass die LEDs durch die Folie hindurchleuchten, also von der Rückseite her mit Elastosil in ihre 3mm-Löcher eingeklebt wurden. Das ist nicht immer ganz einfach, weil die LEDs mit ihren langen Anschlussbeinen dauernd umkippen wollen, bis das Elastosil fest geworden ist, daher stehen einige auch leicht schief. Macht aber nix, wenn sie leuchten, sieht man das wegen der vorgeklebten Folie gar nicht. Es sieht aber ziemlich schick aus, finde ich.

Nicht ganz so schick ist, dass das LCD-Modul nun einen Teil der Beschriftung an der "30dB" verdeckt. Schade, hier hätte ich bei der Planung besser aufpassen müssen. Nicht zuletzt, weil mir meine Frau aber eine Deadline bis zur Beendigung dieses Projekts gesetzt hat (es wartet nämlich bereits ein Neues zur Umsetzung ;-)) sehe ich zu, jetzt weiter voran zu kommen und verzichte deshalb auf die Umgestaltung und den Neudruck der Fronplatte.

Es geht also weiter- die Frontplatte wird probeweise angeschraubt. Und schon macht mir der geringe Platz wieder zu schaffen. Zwischen den Anschlüssen der Schalter und dem eingesteckten PNTS-Modul sind vielleicht maximal 1cm Luft. Das reicht gerade so zum Verkabeln- zu mehr aber auch nicht. Wenigstens kann man durch die modulare Bauweise jedoch das PNTS-Modul herausziehen und so die notwendige Luft zum Löten und Verdrahten schaffen. Das war also echt eine gute Idee von Bernd!



Abbildung 32: viel enger geht's nicht mehr: Blick von hinten in das Gehäuse

10 Netzteil

Wer von Euch halt schonmal eine Bühne verkabelt?



Abbildung 33: um so eine Bühne zu verkabeln, braucht man System! Sogar, wenn ich mit meiner Band darauf auftreten ;-)

Bestimmt der einige oder andere von euch. Der wird auch wissen, dass man normalerweise mit dem Aufbau von HINTEN nach VORNE beginnt (damit man sich mit den ganzen Instrumenten und Equipment sich den Weg nicht selber zustellt). Auch die Verkabelung beginnt man so: zuerst wird alles an 230V-Technik gelegt. Also Steckdosen, Verlängerungskabel und alles, was mit Stromversorgung zu tun hat. Erst dann kommen die Instrumente auf die Bühne, und dann erst die Mikrofonierung und deren Kabel.

Genauso baut man auch ein Gerät:

Die "Bühne" ist quasi das Gehäuse; das "Bühnenlicht" mit den oben hängenden Scheinwerfern könnte unsere Frontplatte sein (wegen der ganzen LEDs drin ;-)) und der nächste Schritt wäre es nun, die Stromversorgung zu legen. Und genau das machen wir auch: bevor wir jetzt irgendwelche Module und HF-Strippen reinbauen, die uns dann eh wieder nur im Weg sind, schaffen wir erstmal die Grundlage: die Stromversorgung!

Der PNTS wird mit zwei Spannungen betrieben (+12V und -12V). Insbesondere die +12V muss sehr rauscharm sein, hatte Bernd mit dem Bastelkreis schon einmal herausgearbeitet. Herausgekommen ist also eine sehr rauscharme Netzteilschaltung mit einem LM723 und einen PNP-Transistor als Längsregler. Eine Platine liegt dem PNTS-Platinensatz mit bei und mit dem üblichen Kampf um wenige Millimeter ;-)) ist die sehr kompakt gehaltene Leiterplatte bald bestückt.

Ich speise von meinem Labornetzteil etwa 15V ein und messe mit einem NF-Voltmeter die AC am 12V-Ausgang. Nach kurzer Zeit bringe ich dort $2,5\mu\text{V}_{\text{rms}}$ zur Anzeige.



Abbildung 34: Ausgangsspannung der 723er-Spannungsreglerplatine

Das NF-Voltmeter (ein Brüel&Kjaer 2636; eines der besten, die ich kenne!) hat eine Mess-Bandbreite von $22,4\text{Hz}..22,4\text{kHz}$.

Die spektrale Leistungsdichte ist also:

$$\frac{2,5\mu\text{V}_{\text{eff}}}{\text{ca. } 22,4\text{kHz}} = 16,7 \frac{\text{nV}}{\text{Hz}}$$

Nochmal 'nen Hinweis zu dem ganzen Wurzel-Kram. Ich habe das lange Zeit nicht verstanden und mich gewundert, was die bescheuerte Wurzel da soll. Eigentlich will man doch wissen, wieviel Rauschleistung das Teil pro Hz abgibt, also wozu die Wurzel?

Ganz einfach: weil wir SPANNUNGEN messen und keine LEISTUNGEN! Es ging aber natürlich auch über die Leistung:

$$U = 2,5\mu\text{V}_{\text{rms}}$$

$$\text{Damit ist } P = \frac{U^2}{R}$$

$$\text{mit Annahme } R = 600\text{Ohm: } P = 10,42 \cdot 10^{-15} \text{ W}$$

$$\text{Bei Messbandbreite } B = 22,4\text{kHz}$$

$$\text{PSD} = P / B = 10,42 \cdot 10^{-15} \text{ W} / 22,4 \cdot 10^3 \text{ Hz} = 465 \cdot 10^{-21} \text{ W/Hz}$$

Dasselbe erhält man auch, wenn man die Wert von oben ($16,7\text{nV/Hz}^{0,5}$) also Leistung (PSD) ausdrückt. Mit $P = \frac{U^2}{R}$

$$\text{PSD} = (16,7\text{nV/Hz}^{0,5})^2 / 600 \text{ Ohm} = 465 \cdot 10^{-21} \text{ W/Hz}$$

Es ist also völlig Latte, ob man mit Spannungen oder Leistungen rechnet. Die Aussage ist identisch und am Ende kommt als PSD immer dasselbe raus. Man muss es nur erstmal schnallen, weil es nicht so offensichtlich ist mit dem \overline{Hz}

In der NF-Technik scheint es sich irgendwie eingebürgert zu haben, über Spannungen zu reden, also merken wir uns die $16,7\text{nV}/\overline{Hz}$

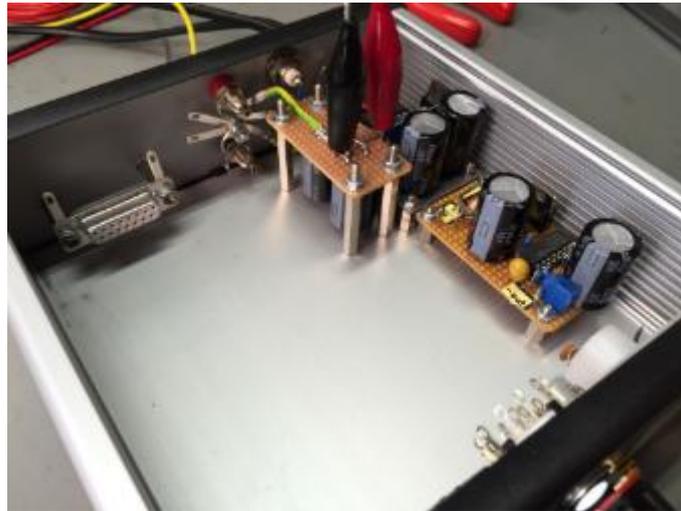


Abbildung 35: Netzteilplatinen und Filterbank

Weil wir für den PNTS aber auch eine -12Volt brauchen und ich es auch irgendwie "gut" machen will, habe ich beschlossen, die rauscharme LM723-Schaltung noch ein zweites mal auf Lochraster aufzubauen. Ich dimensioniere die Leiterplatte etwas großzügiger als die von Bernd, aber trotzdem wird es am Ende dann knapp mit dem Platz. Überraschend ist allerdings, dass ich bei meiner Lochraster-Version schließlich als Rauschspannung am Ausgang nur $1,6\mu\text{Veff}$ messe- also nur $10,7\text{nV}/\overline{Hz}$



Abbildung 36: nicht schlecht! :-)

Den Grund dafür kenne ich natürlich nicht, vielleicht ist es einfach etwas Glück, besonders rauscharme Bauteile gegriffen und eingelötet zu haben, vielleicht liegt es auch daran, dass ich die Masse- und stromführenden Leiterbahnen aus der Seele eines $2,5\text{mm}^2$ dicken Erdungskabels hergestellt habe, vielleicht ist es auch eine Kombination aus beiden. Da die -12V laut

Bastelkreis in dem PNTS gar nicht so kritisch seien, werde ich dem nicht nachgehen, sondern mich einfach nur über das tolle Nachbauergebnis freuen.

Achja- der Brüel&Kjaer hat übrigens einen eigenen Noisefloor von knapp $1\mu\text{Veff}$; in sofern ist das oben gemessene Ergebnis ($1,6\mu\text{Veff}$) bereits relativ stark durch Eigenrauschen fehlerbehaftet und müsste strenggenommen noch nach unten korrigiert werden. (Spare ich mir jetzt aber auch ;-)

Interessant zu wissen:
meine persönlich ausgemessene Ranking-Liste bezüglich Noise-Floor:

1. Brüel & Kjaer 2636 ($5,7\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
2. Brüel & Kjaer 2606 ($8,0\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
3. Rohde & Schwarz UPL ($9,5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
4. Rohde & Schwarz UPGR ($10,6\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
5. HP 339A ($58\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)

Das ist verblüffend, oder? Ich hätte felsenfest erwartet, dass der doch schon relativ moderne UPL hier den Spitzenplatz einnehme. Doch er wird von den alten Brüel&Kjaer's knapp geschlagen und auf Platz 3 verwiesen :-)

Aber am erstaunlichsten finde ich aber den doch relativ hohen Noisefloor des HP339 ($10\mu\text{Vrms}$)! Trotzdem halte ich den 339 für einen echten "Performer", denn sein Generatorteil (nachdem ich ein paar ICs getauscht und weitere Modifikationen vorgenommen habe) liefert einen Klirrfaktor von nur 0,0007% (20Hz..20kHz) und steht damit unangefochten an der Spitze aller meiner NF-Signalgeneratoren für saubere Sinussignale!

11 Rückwand

Zurück zum Thema. Als nächstes konstruiere ich die Rückwand. Hier mache ich mir keine Zeichnung, sondern bastele einfach drauflos. Als Stecker für die Stromversorgung habe ich mich für eine 4polige Mikrofonbuchse entschieden. Dann brauche ich noch 2 BNC-Anschlüsse (für Oszi und FFT-Speki) sowie eine herausgeführte +12V-Leitung- zur späteren optionalen Versorgung eines rauscharmen Referenzoszillators.

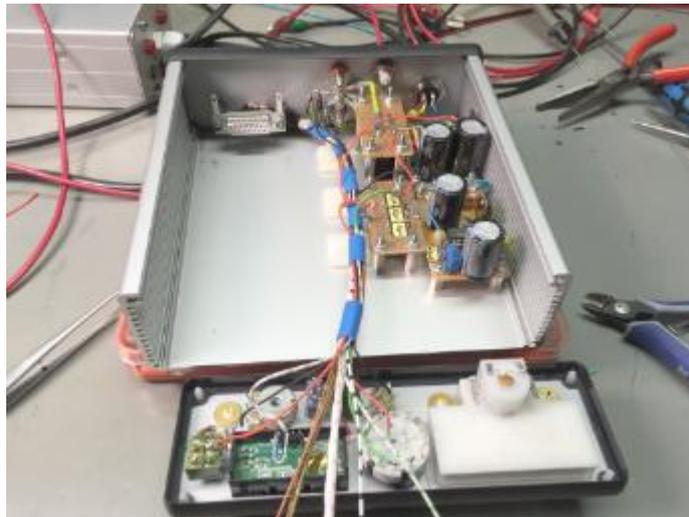


Abbildung 37: so langsam nimmt es Formen an

Dann bohre ich mir noch einen zentralen Massepunkt an mit nicht minder als 6 Lötösen. Weil das Gehäuse eloxiert ist, unbedingt an die Zahnscheiben zwischen den Lötösen und dem Gehäuse denken, denn sonst hat man ungewollte Übergangswiderstände durch die Eloxid-Schicht! Glaubt ihr nicht? Multimeter auf "Ohm" stellen und die beiden Messzinken mal locker auf das Gehäuse halten => Hochohmig! :-) (es sei denn, ihr piekst mit Gewalt durch die Schicht hindurch ;-)

12 zentrale Masseschraube

Bernd empfiehlt die Einhaltung eines strikten Massekonzepts und auch das kennen wir von der Bühne: nämlich in Form von Brummschleifen! Das kann hier ganz genauso passieren; aber nicht nur bei NF kann es "Brummen", sondern auch bei HF! Die Umsetzung seines Masse-Verbindungsplans kann also nur wärmstens ans Herz gelegt werden. Die Rückplatte, die als zentraler Massepunkt dient, reduziere ich auf eben diesen Lötösen-Tannenbaum. Zumindest versuche ich es und löte schon einmal alle Massen zu den Baugruppen dort an:

- natürlich die DC-Eingangsbuchse
- das 12V-Netzteil
- das -12V-Netzteil ("Plus an Masse")
- das eigentliche PNTS-Modul

13 Powerkonzept

Das Massekonzept ist ja nun klar, aber hier macht es tatsächlich Sinn, sich auch über die Betriebsspannung Gedanken zu machen! Ausgangsbasis ist ein Netzteil, das ich mir damals für mein -vom Schrott besorgtes- Grafiktavelt und meinen selbstgebautes VGA-Wandler (für nen alten HP Workstationmonitor, auch vom Schrott) gebaut hatte. Es liefert zwei Ausgangsspannungen (bei geringer Leistung) und kann ziemlich schnell auf +/- 15Volt Ausgangsspannung umgerüstet werden. Die dazu notwendigen Spannungswandler (7815 und 7915) hatte ich damals steckbar gemacht; so ist es eine einfache Sache.

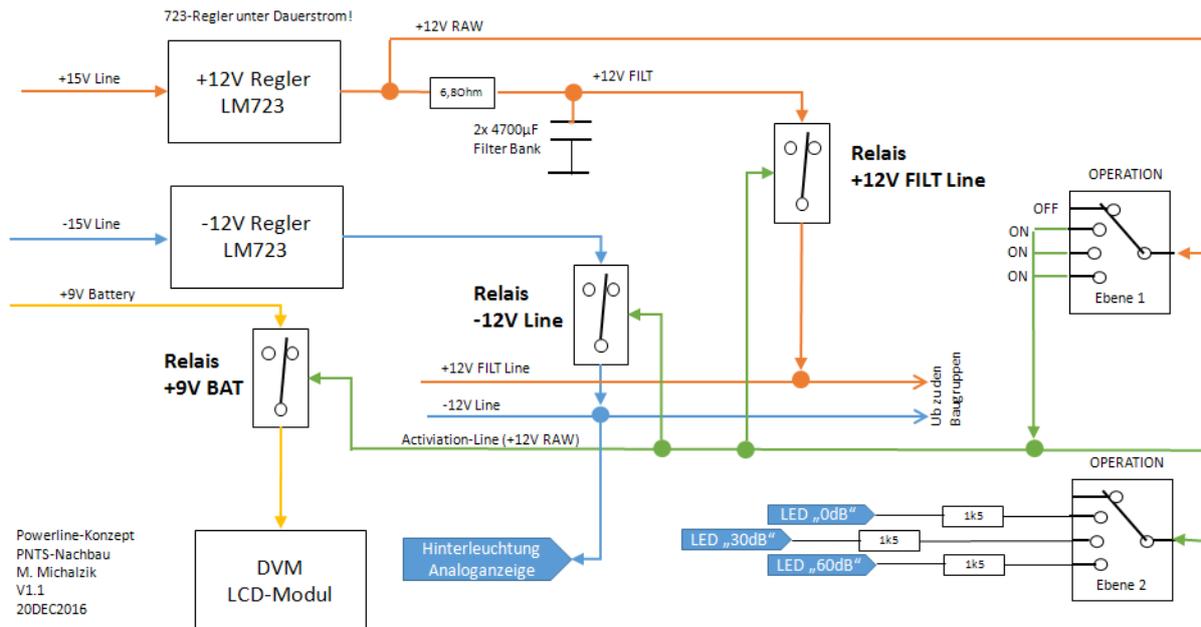


Abbildung 38: Powerkonzept für den PNTS

Diese beiden Spannungen sollen am PNTS dauernd anliegen, sobald ich meinen gesamten Messplatz am Zentralschalter einschalte. Wenn ich nun den PNTS mit dem "Operation"-Drehschalter einschalte, sollen diese "Raw"-Spannungen auf die beiden LM723-Platinen geschaltet werden sowie das LCD-Spannungsmodul mit einer Batterie versorgt werden. Zu diesem Zweck werde ich tatsächlich Relais verwenden. Die Ansteuerung werde ich alle von der +/- 12Volt RAW-Spannungseite her machen, um die Präzisionsgeregelten +/- 12V so wenig wie möglich mit so "Schrott-Kram" wie Relais oder LEDs zu belasten. Doch ein Problem rieche ich schon jetzt: die Trafos in meinem Netzteil sind sehr klein, da muss ich mit jedem mA gehen. Aber aus der Erfahrung erzeugen kleine Trafos auch erheblich geringere Magnetfelder (und damit Brummeinstreuungen), von daher ist das gar nicht so schlecht. Diese Lektion habe ich übrigens gelernt bei der Auswahl eines geeigneten Netztrafos für meine B3 Hammondorgel, bei der ich noch dachte "Muss viel, denn viel hilft viel"! Ja, tat es auch. Brummen ohne Ende ;-)

In einer ruhigen Minute male ich mir das Konzept mal auf, wie ich die Spannungen alle schalten will. Ich denke, ich mache mir eine kleine Lochrasterplatine mit Reed-Relais drauf, die ziehen nicht viel Strom, sind geschirmt und normalerweise sehr pflegeleicht.

Ich muss bei allem natürlich auch stets den mir zur Verfügung stehenden Platz im Gehäuse bedenken. Eigentlich wollte ich auch erst gern noch eine kleine NF-Endstufe mit Lautsprecher einbauen zum Abhören des PLL-Überlagerungstons, aber das wird wohl aus Platzgrün-

den vermutlich nicht mehr klappen. Außerdem würde der fließende NF-Strom bestimmt Rückwirkungen auf die +12V Powerrail haben und sie mit NF "verseuchen", die dann wieder rückwärts in unsere Schaltung geht und Störungen macht. Also lassen wir es lieber.

Dass ich, sobald ich dieses Powerkonzept umgesetzt hatte, den PNTS schon wieder auseinanderreißen und sogar die Relais wieder werde ausbauen müssen, wusste ich zu diesem Zeitpunkt noch nicht!

Es wird Zeit für das Urlaubsbild. Hier zeigt es mich beim Zieleinlauf des New-York Marathons 2016 an der Deutschen Fahne bei ca. Kilometer 42.



Abbildung 39: fast geschafft: nur noch wenige Meter bis ins Ziel!



Abbildung 40: Ziel!

Achja-so sieht das Ziel aus. Kurz darauf wird mir ein völlig erschöpfter Asiate ans Bein kotzen und ich nach den 42,195km noch etwa 5 weitere(!) bis ins Hotel zurück gehen müssen.



Abbildung 41: den Erfolg beansprucht jedoch jemand anders....;-)

14 Aufbau

Der Aufbau geht weiter und ich nehme mir tatsächlich zwei volle Tage Urlaub, um den PNTS weiter zu bringen. Ich stolpere unterwegs über einige Dinge. Beispielsweise über Reed-Relais, die ich eigentlich dazu benutzen wollte, die +/-12V simultan einzuschalten (Bernd meinte, dass der LM358 beschädigt werden könne, wenn man die Spannungen nicht gleichzeitig einschaltet). Ich stelle fest, dass -vermutlich durch die vielen Kapazitäten der 12V-Filterbank- im Umschaltmoment hohe Stromspitzen fließen und damit die Relaiskontakte verkleben! Will sagen: man schaltet aus, aber das Relais fällt nicht ab! Ich habe einen halben Tag gebraucht und habe am Ende schon fast an mir selbst gezweifelt, aber schließlich ein Relais gefunden, das den Strom offensichtlich besser schalten kann.

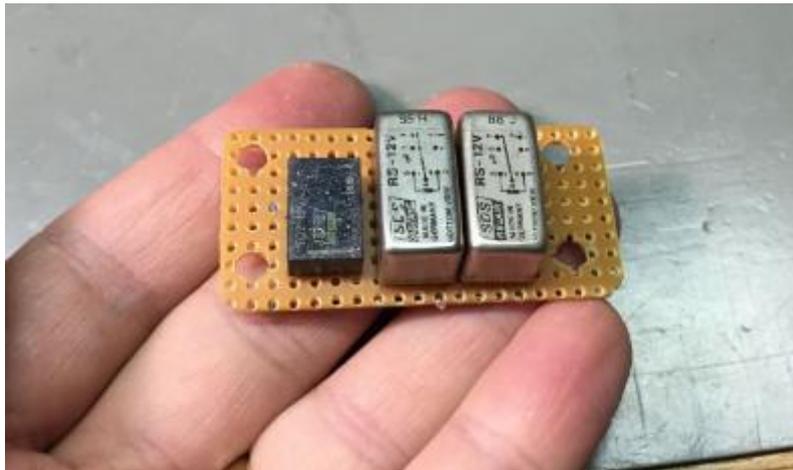


Abbildung 42: Relaisplatine

Dann bin ich an meinem geplanten Netzteil gescheitert, das mit 300mA Kurzschlussstrom nun eindeutig zu schwach dimensioniert ist und ich nicht verwenden kann. Um mich mit Netzteil nicht weiter aufzuhalten, habe ich an den PNTS ein Kabel mit Bananensteckern drangemacht und mache die weitere Inbetriebnahme mit einem 15V Labornetzteil.

Dann hatte ich den Effekt, dass die Primärseite des 723-Reglers schwingt! Die Drossel im Eingang der 723er-Platine konnte als Verursacher identifiziert werden und ein primärseitig hinzugefügter Elko mit 220 μ F hat hier schließlich für Ruhe gesorgt.

15 Inbetriebnahme

Irgendwann ist es dann so weit und ich beginne, den PNTS in Betrieb zu nehmen! Zuerst will ich den Noisefloor des LNA messen. Also Mischer rausgezupft, stattdessen eine kleine Kurzschlussbrücke in den "IF"-Port eingesteckt- Bernds Idee mit den Steckhülsen ist wirklich eine tolle Sache!

Am Ausgang schließe ich mein B&K 2636 NF-Voltmeter an und an den Monitorausgang eine kleine Aktivbox. Damit höre ich mir das Ausgangssignal an und freue mich, dass ich so gut wie kein 50Hz-Brummen höre- nur schönes Rauschen!

Ich lese ab: $88\mu\text{Veff}$ Rauschpegel bei einer Messbandbreite von 22,4kHz!



Abbildung 43: NoiseFloor

Also zurückrechnen:

am Ausgang haben wir dann $588\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

Da der Amp 60dB (=Faktor 1000) Verstärkung macht, haben wir dann -bezogen auf den Eingang-

$0,588\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

und das passt wunderbar zu den Werten aus den Dokumenten von Wenzel, Kaa und Prof. Baier :-)

16 Spannungslupe

Das Anzeigeelement, das wir ja aus einem SAT-Finder ausgelötet haben, zeigt uns jeweils die Gleichspannung aus dem Mischer an. Wenn Referenz- und Messsignal in Quadratur sind (also 90° Phasenverschiebung zueinander haben), liefert der Mischer genau 0V DC und die Anzeige sollte genau in der Mitte stehen.



Abbildung 44: der PNTS wächst und wächst

Nun finde ich Folgendes heraus: der LM358 macht mir leider einen dummen Offset!

In der 0dB-Stellung ist der rückseitige "PM"-Ausgang gleichspannungsgekoppelt. Man sieht also direkt das tiefpassgefilterte Ausgangssignal des Mischers. Je nach Phasenlage hat man am Mischer Ausgang etwa zwischen $-0,7$ und $+0,7$ VDC. In Quadratur erwartet man da ziemlich genau 0V. Leider kriege ich einen deutlich negativen Offset am Ausgang. Ich messe mich durch die Schaltung und finde den LM358 als Ursache: bereits die erste als Impedanzwandler geschaltete OP-Stufe bringt mir hier einen Offset in die Leitung. An den Betriebsspannungen liegt es nicht, die sind alle sauber. Also ende ich damit, verschiedene LM358 zu selektieren. Ich finde schließlich einen mit nur 41mV Offsetspannung. Der wird eingebaut und somit verbessere ich den Anzeigebereich immerhin etwas: und zwar von

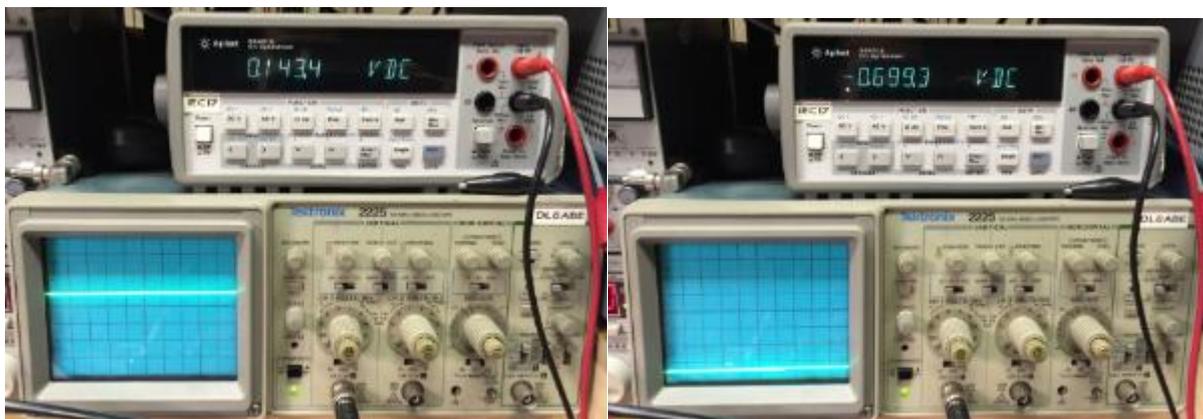


Abbildung 45: leider ist der Aussteuerbereich nicht wirklich symmetrisch...

+145mV/-700mV

auf

+385mV/-480mV

an Ausgang "PM". Nicht wirklich toll, aber keine deutliche Verbesserung.

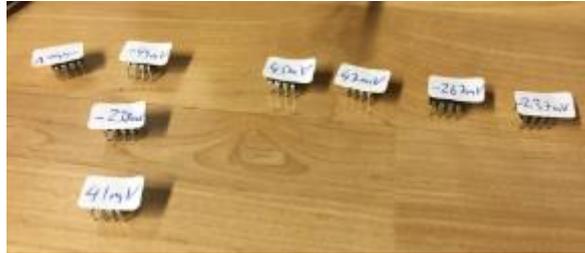


Abbildung 46: LM358 selektieren

Ich dachte schon, ich könnte mir über eine weitere Offsetkompensationsschaltung Gedanken machen, da passiert das:

17 Ernüchterung

auf einen Schlag wird der NoiseFloor des PNTS lauter! Ich dachte erst, ich hätte mich verhört. Doch ich messe nach: $120\mu\text{Vrms}$! Nanu?!? Wo kommt das denn her? Und vor allen Dingen- wenn ich den HF-Amp mit einschalte- höre ich gaaaanz leise ein kleines Piepsen, das wir Überlagerungspfeifen klingt. Ohje, was ist das nun wieder?

Ich probiere Vieles aus, komme aber schließlich darauf, dass die PLL mir hier Ärger macht. Nachdem ich das PLL-IC (OP07) herausgezupft habe, ist "Ruhe": ich messe wieder die $88\mu\text{Vrms}$ und höre beim Zuschalten des HF-Amps auch kein Pfeifen! Aha.

Doch dieser Effekt soll nicht die einzige Beobachtung bleiben: das PNTS-Modul ist so empfindlich und mimosenhaft, dass ich mich ernsthaft frage, wie ich damit jemand ordentlich messen soll.

Ich begeben mich trotzdem auf die Suche nach den $37\mu\text{V}$ ($120-88$;-)) und finde ich einen schwingenden Schaltungsteil vor. Daher auch das Pfeifen! Irgendwie scheint sich die Schaltung insbesondere dann gut aufzuschaukeln, wenn der der HF-Amp mit zugeschaltet wird. Man erkennt dann sogar am PN-Ausgang eine sehr schöne 140kHz -Schwingung, die dem eigentlichen NF-Signal überlagert ist. Zu allem Überfluss schwankt diese 140kHz -Schwingung auch noch periodisch (ca. 1Hz) und ist durch die Einstellung des "Loop BW" Potis beeinflussbar.



Abbildung 47: es schwingt, wo man nur hinsieht :-)

Ich muss gestehen: so langsam blicke ich nicht mehr durch. Was ist hier los?!? Als die Schaltung dann auf einmal auf $190\mu\text{V}$ Noisefloor klettert (startend von $88\mu\text{V}$), reicht es mir!

18 Rückbau

Schweren Herzens tue ich etwas, was man nur EXTREM ungern tut: ich starte den Rückbau!

Es werden sämtliche nicht benötigten Anschlüsse am PNTS-Modul abgelötet, sämtliche Masseverbindungen und Schnittstellen zur Außenwelt. Schließlich liegt das PNTS-Modul wieder bei mir einzeln auf dem Tisch, nur am Labornetzteil angekabelt und schmerzlich stelle ich fest, dass das Schwingen nun vorbei ist. Also: mein Massekonzept ist Mist*.



Abbildung 48: Das macht niemand gerne: Rückbau!

Das ist hart, denn ich hatte mir da so viel Mühe gegeben.

Außerdem läuft mir die Zeit weg: meine Frau hat mir bis Weihnachten Zeit gegeben, nun haben wir bereits den 15.12.2016 und ich jage HF-Brummschleifen hinterher!

* stimmt nicht! Aber das dachte ich in diesem Moment noch!

19 Bittere Pille

Meine lieben Bastlerfreunde, ich glaube, jeder Einzelne von Euch kann sich nun vorstellen, wie schwer es mir gefallen ist, ein bereits zusammengebautes Gerät, für das man sogar zwei ganze Urlaubstage geopfert hat, wieder auseinanderzureißen. Jede einzelne Lötverbindung und jede einzelne Schrauben tun einem da weh. Dass es aber doch der richtige Weg war, wird sich gleich zeigen. Trotzdem: so etwas macht einem Bastler nicht wirklich Spaß und zu dem Zeitpunkt weiß man ja noch nicht, ob der Rückbau einen in Summe voranbringen oder zurückwerfen wird.

Als am Ende jedenfalls die nackte PNTS-Hauptplatte vor mir auf dem Tisch lag, musste ich arg kämpfen, dass mir nicht ein paar Tränchen auf die EMV-Unterlage tropfen.

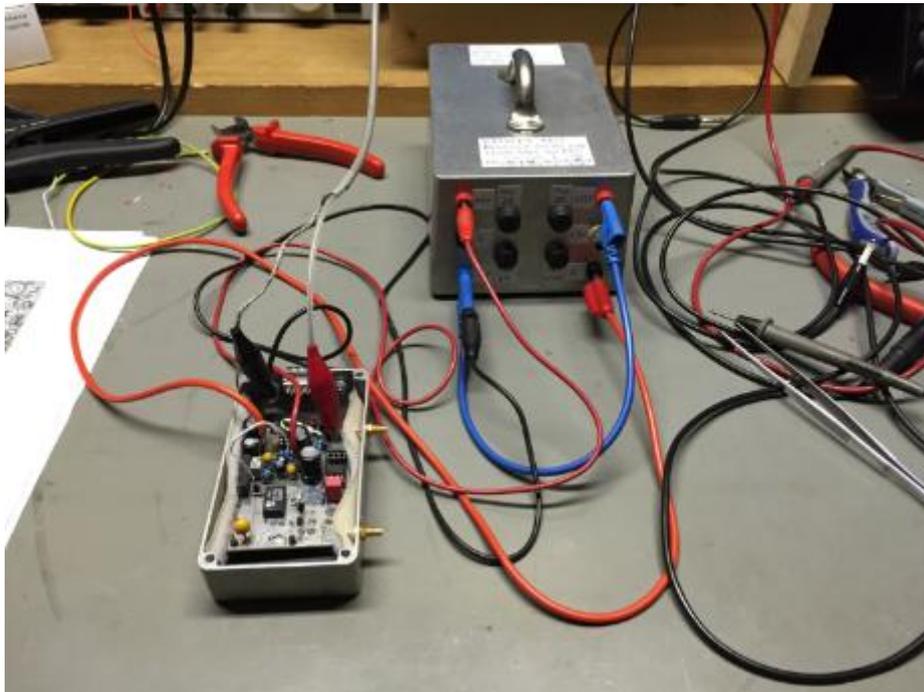


Abbildung 49: die PNTS-Platine auf dem Operationstisch- gespeist von meinem Battery-Pack

20 Swinging Jazz

Und dann passiert es trotzdem: der Anstieg von $88\mu\text{Veff}$ Noisefloor auf $120\mu\text{Veff}$, ein Pfeifen und ein periodisches Klicken aus meinem Kontrolllautsprecher!



Abbildung 50: der PNTS tanzt mit mir...

Wie jetzt...wie kann das jetzt noch passieren? Die Platine liegt hier nackt auf dem Tisch, völlige potenzialfrei gespeist von meinem Batteriepack (das ich eigentlich für mein Thermal Transfer Normal Fluke 540B gebaut hatte)- wie soll es jetzt hier noch eine Masseschleife geben?

Und vor allen Dingen- wie kommt es, dass ich sogar eine Änderung des Rauschens höre, wenn ich mit dem Rollstuhl über den Laminatboden im Zimmer fahre?????

Hier ist doch irgendwas oberfaul! Jetzt reicht es. Ich hole die Feldhaubitze der HF-Technik aus dem Schrank.



Abbildung 51: Ich auf Großkaliberjagd

Die gute alte HP Magnetfeldsonde (30MHz..1GHz) bringt es zum Vorschein: der PNTS schwingt!!! Und zwar bei über 600MHz! Er macht so viel Duse, dass ich den Träger sogar locker mit meinem Messempfänger hören kann (mit -40dBm am Antenneneingang!!!), der neben mir im Regal steht!



Abbildung 52: mein PNTS sendet!

Jetzt beginne ich langsam zu verstehen: die ganze Empfindlichkeit und das ganze mimosenhafte Verhalten war nicht mein Massekonzept. Es war eine* schwingende Stufe im PNTS selbst!



Abbildung 53: im Labor stärker als NDR1: der PNTS "on air" bei 678MHz!

* bzw. mehrere, aber lest selbst

21 Zum Tanz, bitte!

Interessant ist, dass ich hier zwei Dinge beobachte:

a) eine Schwingung von ca. 600MHz, die irgendwo um T1, T2 und T3 herum zu entstehen scheint

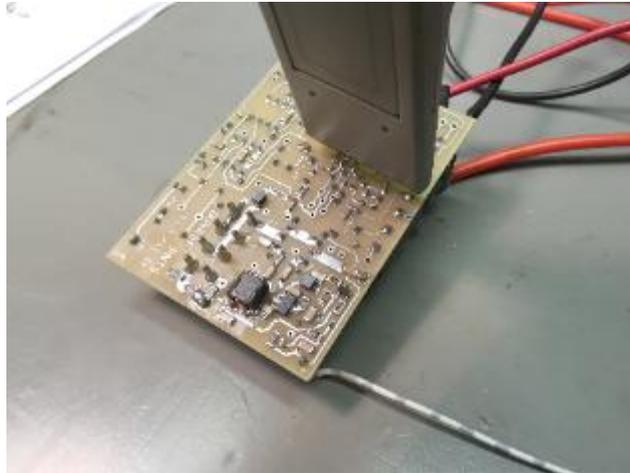


Abbildung 54: Feldsonde in Aktion

b) eine dem NF-Ausgang überlagerte Schwingung von ca. 140kHz, die einsetzt, innerhalb ca. 1 Sekunde von ca. 140...160kHz hochsweept, dann abebbt, um nach einer weiteren Sekunde erneut bei 140kHz zu starten.

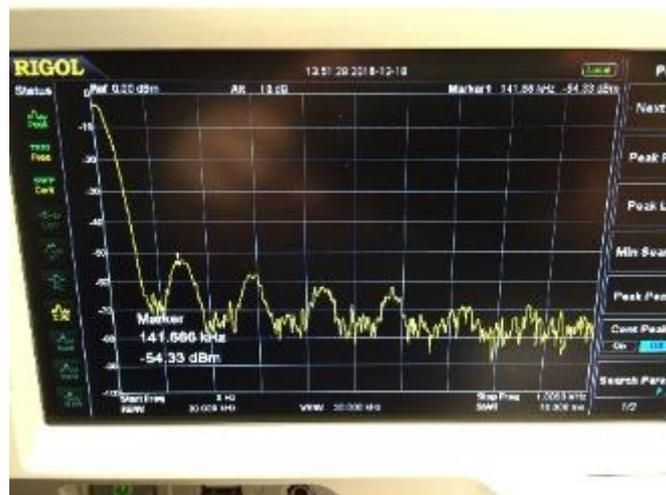


Abbildung 55: Ausgangssignal am "PM"-Ausgang des NTS

Interessant auch: sobald ich den HF-Amp mit zuschalte, wird die b)-Schwingung permanent.

Außerdem setzen sowohl a) als auch b) nicht permanent ein. Wenn ich z.B. die Betriebsspannung neu anlege, schwingt meistens erstmal nix. Ich messe brav meine $88\mu\text{Vrms}$ NF-Rauschen am "PM"-Ausgang und man könnte denken, dass alles funktioniert. Dann auf einmal setzt jetzt das Oszillieren ein, die NF steigt auf $>120\mu\text{Vrms}$ und -wenn man das Oszi dranklemmt- erkennt man auch die 140kHz-Schwingung.

22 Suche der Ursache

600MHz

Ich muss zugeben, dass ich es HASSE, Fehlersuche bei solchen Schwing-Verstärkern zu machen. Es ist ziemlich schwer, die wirkliche Ursache zu finden und nicht nur an den Symptomen herumzudoktern. Entsprechend viel versuche ich auch. Ich löte beispielsweise R5 und R6 (je 100Ohm-Widerstand) auf SMD um, weil ich vermute, dass der Transistor BF246 hier zu viel Induktivität sieht.

zusätzlicher Abblock-C

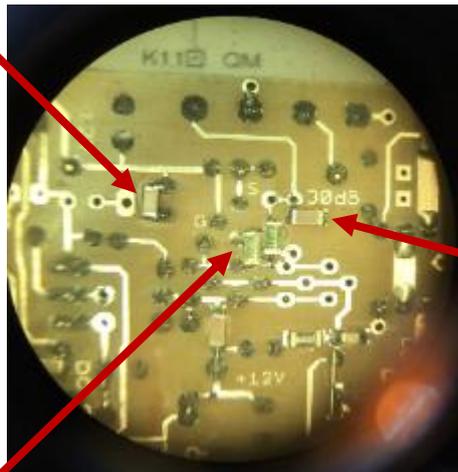


Abbildung 56: Mikroskopaufnahme

R5 und R6 auf SMD umgelötet

Ich zupfe ICs heraus, um Wechselwirkungen auszuschließen. Ich löte Durchkontaktierungen nach, um bessere Masse zu schaffen. Ich baue 100nF SMD's unterhalb C11 und C19 zur HF-Unterdrückung an. Bringt aber alles nix. Dann liefert Bastelfreund Dietmar die Idee, den Kondensator C8 (100pF) gegen ein anderes Modell auszutauschen und zu beobachten, ob die Schwingung sich ändert. Also mache ich das, löte 150pF ein, freue mich erst, weil erst nix schwingt. Dann schwingt's doch- mit etwa 10MHz geringerer Frequenz. Am Ende entferne ich C8 ganz, weil auch in unserem Bastelkreis niemand so richtig weiß, wozu der eigentlich gut ist. Möglicherweise eine Art Kompensation des Relais, das die Konstantstromquelle um T3 herum kurzschließt, wenn 60dB Verstärkung gebraucht werden. Er stammt jedenfalls aus der Wenzel-Originalschaltung und ist -soweit wir es wissen- nicht weiter dokumentiert.

Lustig: mit dem Entfernen von C8 herrscht Ruhe bei 600MHz! Ich habe zwar nicht wirklich verstanden, wie genau der Selbsterregungsmechanismus hier funktioniert, aber C8 hat eindeutig was damit zu tun und wenn der PNTS bei ausgelötetem C8 selbst nach Stunden des Laufens noch "Ruhe gibt", ermutigt mich das, (zufällig) was richtig gemacht zu haben.

140kHz

Trotzdem gibt es da ja immer noch den 140kHz-Störer auf dem NF-Ausgang. Nach vielem Hin und Her scheine ich im Nachhinein nun C4 (820pF) dafür verantwortlich machen zu können, der sich am Messgerät mit 1000pF und einem sehr schlechten Q-Wert (~50) nicht gerade positiv hervortut. Als ich ihn austausche gegen einen neuen (ausgemessenen) 820pF-Kondensator, ist schließlich auch hier Ruhe!

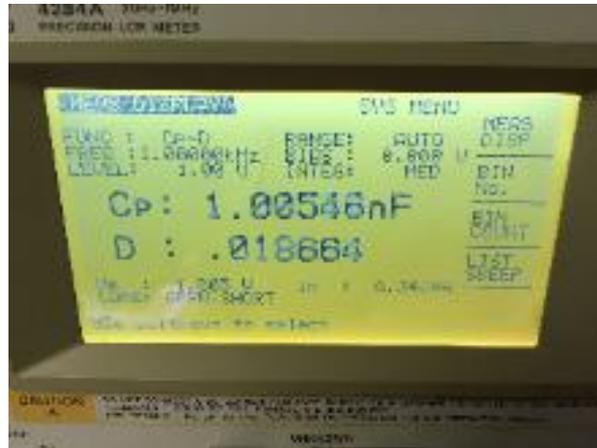


Abbildung 57: alter C4 mit schlechter Güte

Auch hier muss ich zugeben, dass professionelle Ursachenforschung anders aussieht, meine Methode war eher ein "probieren" denn physikalisch ergründen, aber auf der anderen Seite habe ich so etwas auch nie gelernt und beanspruche auch kein berufsmäßiges HW-Entwicklerniveau. Anstatt mich also über meine eigene Inkompetenz zu ärgern, beschließe ich schließlich, mich darüber zu freuen, dass der PNTS nun komplett schwingungsfrei (sogar der HF-Amp erzeugt keine zusätzlichen Rauschteppich mehr!) und fast richtig "handzahn" arbeitet und mit ziemlich konstanten $86..88\mu\text{Vrms}$ am Ausgang locker das von Wenzel angegebene Rauschniveau erreicht ($0,5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$).



Abbildung 58: Rauschniveau am "PM"-Ausgang

Trotzdem: die extreme Störanfälligkeit gegenüber Fremdeinflüssen ist zwar verschwunden, doch darf man jetzt nicht schludrig werden. Bei meinen Versuchen stellte ich fest, dass selbst das Anklemmen der Oszilloskopklemme (geerdet!) mit Bedacht gemacht werden muss. Je nachdem, wo man sie anklemmt, hat das schon leicht verschieden starke Brumm- Auswirkung!! Klar, im Moment ist ja alles offen und ohne Gehäuse, da können solche Effekte schon auftreten.

23 Dauerlauf

Nach intensiver Diskussion mit dem Bastelkreis haben wir zwar noch immer keine schlüssige Erklärung für die Schwingneigung, sind uns aber sicher, dass der Leckstrom von C4 damit zu tun haben könnte. Der derzeit eingelötete C4 ist ebenfalls ein keramischer Kondensator ist zwar dichter dran an den 820pF, hat aber dennoch ebenfalls ein D von etwa 0,018. Man rät mir, hier -obwohl gerade nix mehr schwingt- trotzdem einen anderen einzusetzen. Ich finde ich meinem 820pF Styroflex in der Schublade meiner Magazinwand, der sogar meine LCR-Messbrücke herausfordert (D = 0,000045). Er trifft den Wert "824pF" sehr exakt und zeigt auch keine solcher Einlaufeffekte, wie bei dem keramischen Kondensator (C-Wert läuft nach Anklemmen an die Messbrücke um knapp einhundert pF hoch!).



Abbildung 59: Messung von C4

Ich löte also den Styroflex ein, achte dabei auch darauf, das eine Lötbeinchen von R3 wegzu-biegen, denn hier hatte ich im Schwingfall mit dem 10:1-Tastkopf besonders hohe 600MHz-Amplituden gemessen (fragt mich nicht, warum- möglicherweise kapazitives Einkoppeln des abgekniffenen Draht-Anschlussbeinchen von C4 auf das Anschlusspad von R3?).

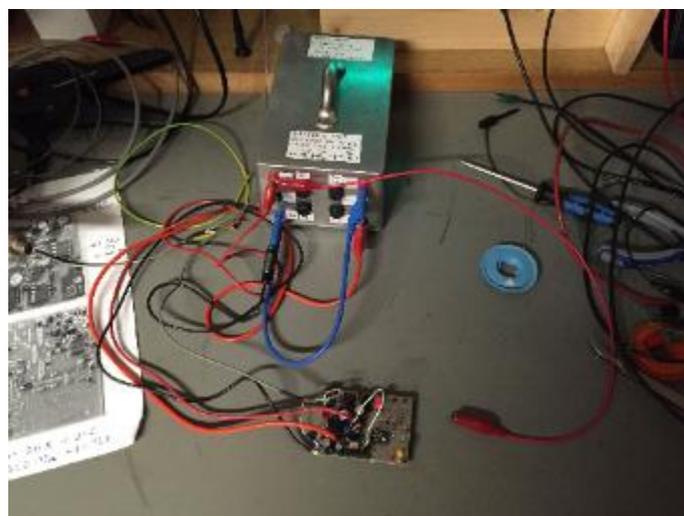


Abbildung 60: PNTS Hauptplatine am Akkupack

Ich lade meinen mobilen +/-12V Akkupack neu auf, schlieÙe meine PNTS-Platine an, kontrolliere zufrieden den Noisefloor (86..88µV) und lasse sie einen ganzen Tag lang laufen. Meine Erfahrung ist es, dass -wenn die Schwingung einmal begonnen hat- sie von alleine nicht mehr abbricht, sondern bestehen bleibt. Bedeutet: wenn ich heute abend wieder in den Keller gehe und der Zeiger meines NF-Voltmeters weiterhin auf 86..88µV steht, schwingt aktuell nix und es hat zwischenzeitlich (höchstwahrscheinlich) auch nichts angefangen, zu schwingen.



Abbildung 61: nur 88µVeff NF Noisefloor- das ist gut! Hoffentlich bleibt es so ;-)

Ich weiß, so richtig "professionell" ist auch dieser Ansatz nicht. Ein richtiges Monitoring fehlt und auch hier reicht wohl ein Tag Dauerlauf kaum aus, um eine Zuverlässigkeit nachzuweisen. Vermutlich werde ich diesen Vorwurf auch wieder in irgendwelchen Foren lesen. Aber bleibt bitte fair: die Zeit für mein Elektronikhobby ist leider begrenzt (meine Fähigkeiten übrigens auch!) und ein einfacher 1Tages-Dauerlauftest ist immernoch besser, als gar kein Test! Oder?

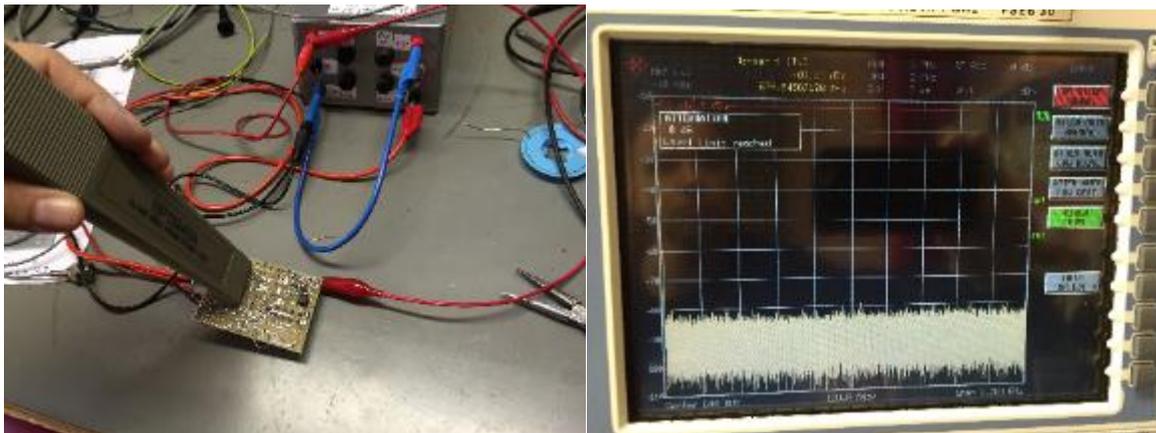


Abbildung 62: auf der Suche nach HF...

24 Kontrollmessungen

Bevor ich den PNTS wieder in seine Schachtel einlöte, möchte ich jedoch prüfen, ob meine Modifikationen (C8 weglassen, C4 umbauen, R5 und R6 als SMD) keine Randeffekte hervorrufen. Dazu mache ich ein paar Prüfungen.

1. WÄRMEBILD

Hier sehe ich, dass R5 und R6 (jetzt ja SMD) in ihrer Strombelastbarkeit nicht überfordert werden. Alles gut, außer ein paar Eigen-Spiegelungen durch die verzinnte Leiterplatte und einem relativ warmen BF246 nix Schlimmes zu sehen.

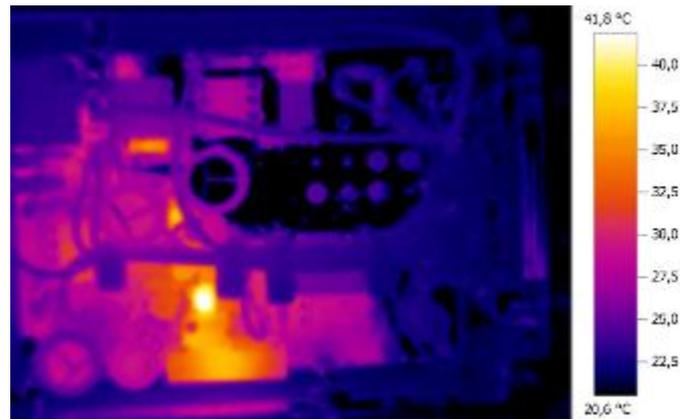


Abbildung 63: Wärmebild des PNTS-Platine (von oben)

2. NF-FREQUENZGANG

Hatte ich anfangs ja schon einmal gemessen, mache ich nach den Umbauten aber nochmal.

a) 0dB

b) 30dB

c) 60dB

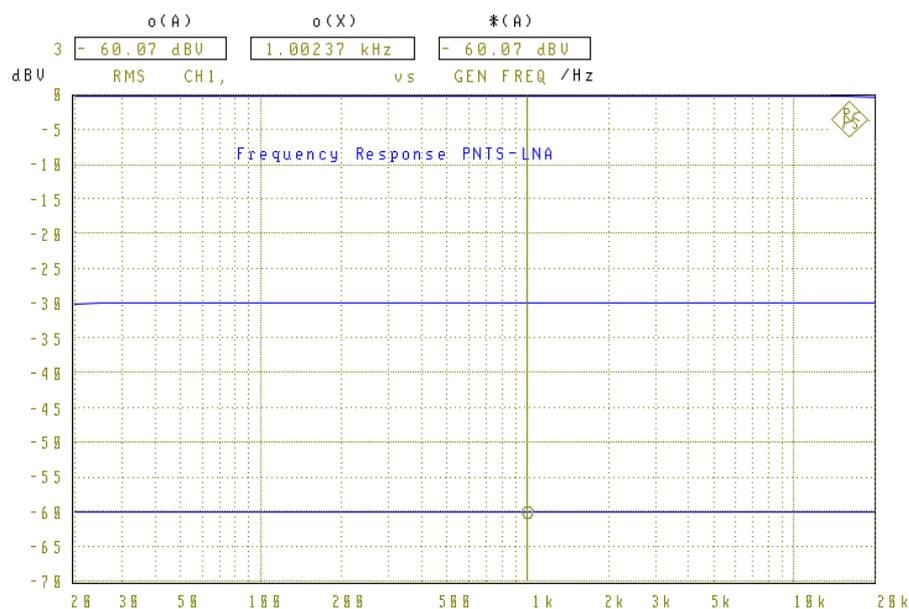


Abbildung 64: Verstärkungsmessung mit dem R&S UPL

3. PHASENGANG

a) 0dB

b) 30dB

c) 60dB

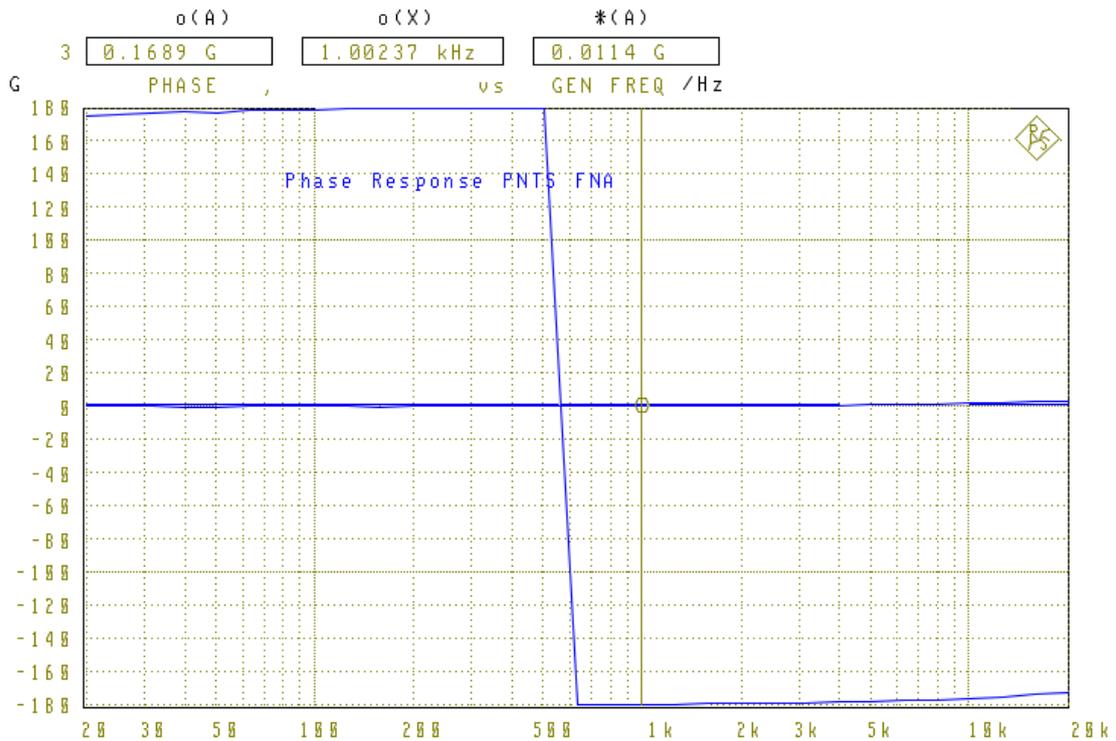


Abbildung 65: Messung des Phasengangs

4. NOISE FLOOR

Hatte ich ja eigentlich bereits die ganze Zeit geprüft. Mischer rausziehen und den IF-Anschluss nach Masse brücken. Dann am PM-Ausgang den Noisefloor messen.

a) mit ausgeschaltetem HF-Amp: max. $88\mu\text{Vrms}$



Abbildung 66: der Low-Noise-NF-Amp liefert nur knappe $88\mu\text{Vrms}$ Rauschen

b) mit eingeschaltetem HF-Amp: nahezu unverändert

Große Überhöhungen oder sporadisch auftretende Spitzen würden von Schwingneigungen des PNTS zeugen. Wichtig: für diese Messungen alle möglichen Magnetfeldquellen deaktivieren (LötKolben, Leuchtstofflampe (Vorschaltgerät!), nicht gebrauchte Messgeräte, Handy, ect.)

5. Verstärkung des HF-AMP

Einspeisen in "DUT-Buchse", abgreifen aus "LO-Buchse" (Mischer herausgezogen). Messung mit Netzwerkanalyzer.



Hier habe ich das Bild vom NWA irgendwie "vefummt" - ich finde es leider nicht mehr, sorry!

Abbildung 67: Bild weg

25 Nicht schon wieder...

Es nimmt kein Ende. Der PNTS bittet erneut zum Tanz: diesmal mit einem Aufschwingen bei etwa 0,15Hz! Ich schluchzte! Wir kennen 600MHz. Wir kennen 140kHz. Aber 0,15Hz- das ist neu.

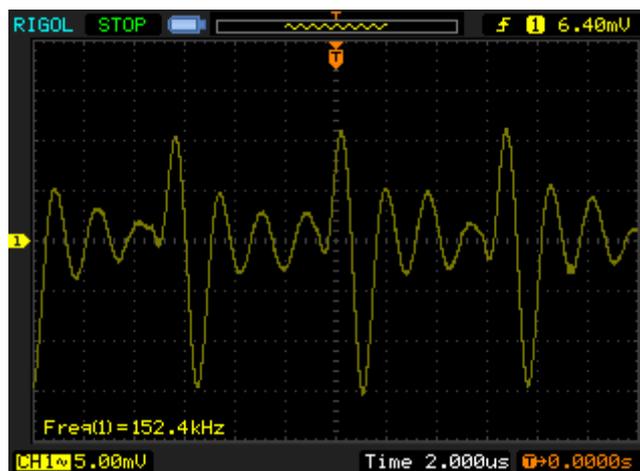
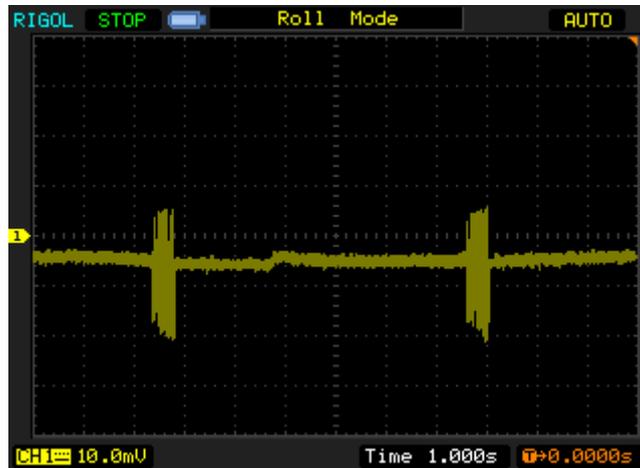


Abbildung 68: ein neues Problem! (gemessen am Ausgang "PM")

So langsam stehe ich kurz vor der Verzweiflung. Nach einem endlosen ratlosen Gesicht (siehe Bild) messe ich mich mit der Tastkopf durch die Schaltung und bleibe schließlich beim extra auf niedrigen Offset selektierten LM358 stecken!



Abbildung 69: SCHLUCHTZ!!!

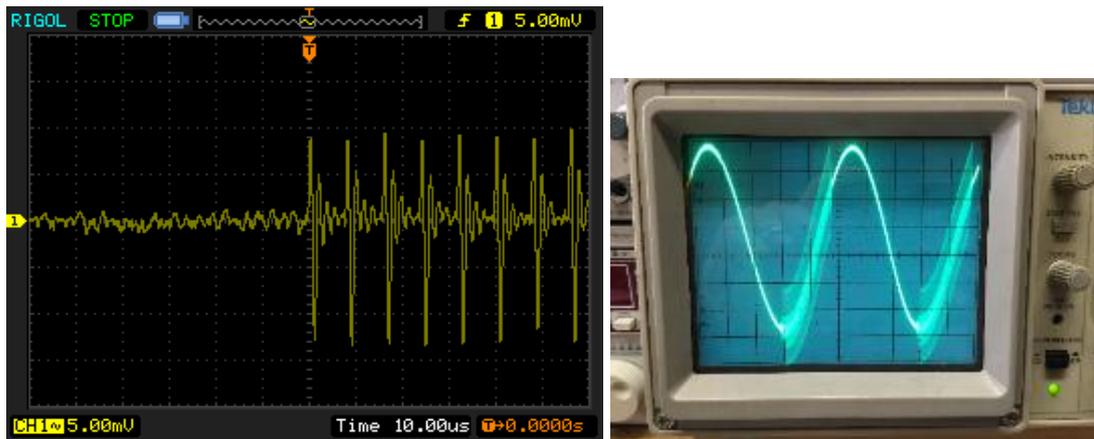


Abbildung 70: Schwingeneinsatz!

Nach einem Austausch gegen ein anderes Exemplar aus der Bastelkiste ist der DC-Offset natürlich wieder etwas höher, aber -und das ist Wichtiger!- die Schwingneigung ist auf einmal weg! Ich habe auch hier den Fall nicht weiter ergründet. Der ursprünglich speziell selektierte LM358 jedoch gehörte zu einer Produktionsserie, die zwar in meinem LM358-Schubfach liegt, jedoch eine Art "Alternativbaureihe" zu sein scheint, denn er trägt eine leicht abweichende Produktbezeichnung.

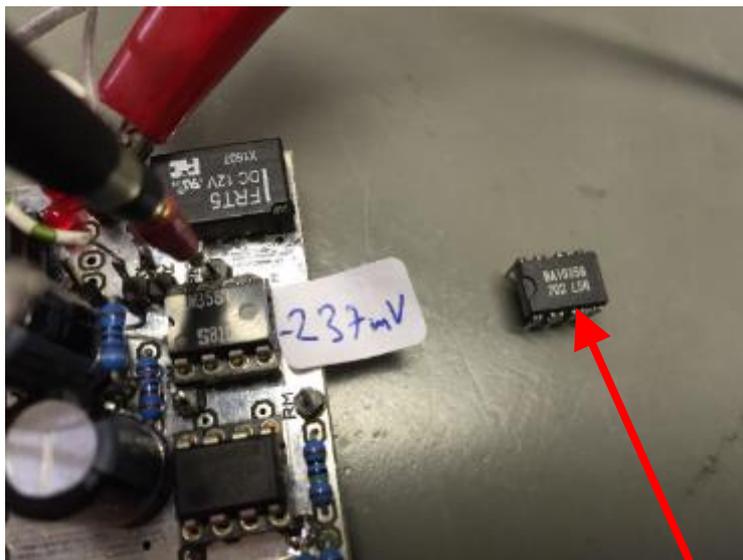


Abbildung 71: Griff ins Klo- der "Pseudo LM358"

Alle ICs seiner Baureihe haben diese um ca. den Faktor 5 kleinere Offset-Spannung (verglichen mit den "echten" LM358), daher könnte es wirklich sein, dass hier auch eine abweichende innere Beschaltung vorliegt. Und die könnte möglicherweise die Schwingneigung begünstigen.

Also: egal, raus mit dem Ding und den Offset-behafteten, aber wenigstens stabil funktionierenden "ehrliehen" LM358 rein.

Damit sieht dann auch das Oszilloskopbild schon wieder deutlich besser aus:

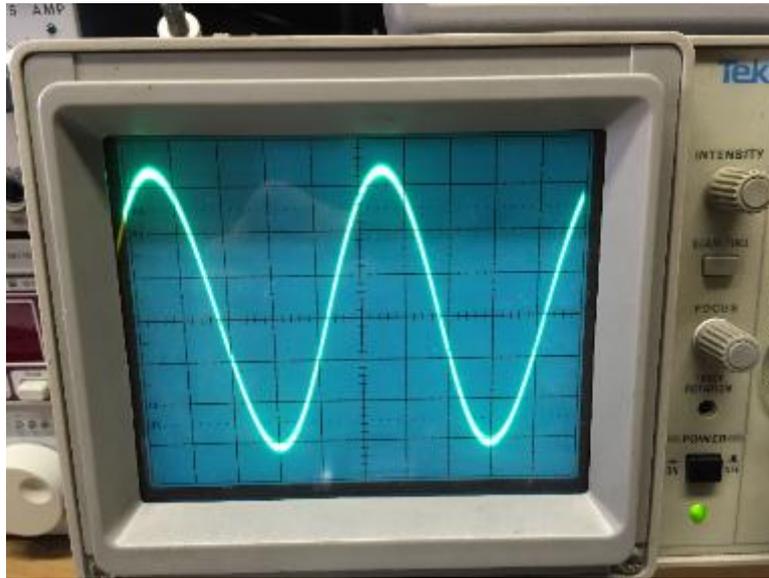


Abbildung 72: schon besser!

26 Quadraturlupe

Aber auch damit habe ich noch Probleme. Eric sagt, dass ein PNTS eben nicht so einfach zusammenzulöten sei wie ein Digitalmultimeter und damit hat er sicher recht. Es tröstet mich etwas, aber irgendwie habe ich das Gefühl, dass mir der PNTS einfach eine Nummer zu hoch ist.

Der PNTS schwingt zwar nun nicht mehr, zeigt aber am Ausgangssignal starke Verzerrungen, sobald er stark angesteuert wird (z.B. bei der BeatNote, vgl. Kapitel 30). Wo also kommt das nun wieder her?

Ich stelle fest, dass das Problem verschwunden ist, sobald ich die Signalleitung zur Quadraturlupe ablöte! Offensichtlich scheinen die Dioden in der Rückkopplung des OpAmps für die Quadraturlupe eine Rückwirkung auf die Ausgangsstufe im PNTS zu haben. In meiner Not löte ich kurzerhand einen 10kOhm-Widerstand als Vorwiderstand ein, verringere damit zwar die Verstärkung von ~ 47 auf ~ 15 , erhöhe damit aber auch seinen Eingangswiderstand von ca. 4,7kOhm auf ca. 15kOhm!

Versuche mit verschiedenen Widerstandswerten scheinen 10kOhm als idealen Kompromiss zwischen Verstärkung und Eingangswiderstand zu bestätigen. Die Verzerrung ist damit weg, und auch die Quadraturlupe gefällt mir mit der geringeren Verstärkung in ihrem Anzeigeverhalten irgendwie besser.

Mit diesem Vorwiderstand gelingt mir sogar der Mittelabgleich und die Verstärkungseinstellung weitaus besser. Ist der PNTS in Quadratur, steht die Nadel nun sehr schön auf "Mitte" und schwankt auch nicht mehr so heftig (logisch, geringere Verstärkung), was vielleicht andere Nachteile hat, mir aber erstmal so besser gefällt.



Abbildung 73: Es ist übrigens gerade Weihnachtszeit 2016- und ich zünde speziell für den Bastelkreis und "seinen" PNTS eine 5te Adventskerze an! Ob's hilft? ;-)

27 Vorbereitung auf die "Erste Messung"

Glücklicherweise war das Problem mit der Quadratlupen nun wirklich erstmal mein letztes und so stehe ich nun kurz vor der "echten" Inbetriebnahme. Meine "erste Messung" war strenggenommen die "zweite Messung", denn die wirklich "erste" ging natürlich erstmal richtig in die Hose. Diesmal lag es aber ausnahmsweise nicht am PNTS, sondern einfach daran, dass es mir wirklich schwer fiel, eine richtig absolut in " $\text{dBc}/\overline{\text{Hz}}$ " kalibrierte Anzeige am FFT-Analyzer herzustellen! Dabei gibt es so viel zu beachten, dass ich hier tatsächlich erst nach Monaten der Beschäftigung erste Erfolge vermelden konnte.

Natürlich hätte ich es mir auch einfach machen, eine EMU-Soundkarte und Bernd Anleitung nehmen können. Das hätte viele Vorteile gehabt; beispielsweise auch die SW "Audiometer" von Prof. Baier, DG8SAQ, die hervorragend mit dem PNTS zusammenarbeitet.

Warum also schwer machen?

Nunja, vielleicht hängt es mit dem Alter zusammen. Wenn man -wie ich- langsam über 40 Lenze erleben durfte, wird man vielleicht etwas wunderlich. Vermutlich (nur) aus diesem Grund entwickelte ich inzwischen eine solche Computer-Abneigung, dass ich die Dinge in meinem Leben eigentlich nicht mehr sehen will. Seit auch die Smartphones seit iOS6 eigentlich für mich nur noch nutzloser und unbrauchbarer werden, kann man mich bereits mit der bloßen Erwähnung dieses Themas auf einen Puls bringen, den ich normalerweise nur beim Zieleinlauf eines schnellen gelaufenen 10km-Spurts habe!

Meine Computerablehnung schlägt leider neuerdings sogar in echten Hass um, so dass ich mich von PC-Lösungen -so gut es geht- abnabeln muss, um im Alltag nicht völlig durchzudrehen. Leider geht das inzwischen nicht mehr vollständig, das weiß ich auch. Aber wenigstens die Dinge, die ich noch beeinflussen kann; wenigstens für die kann ich ja versuchen, auch ohne "Apps" und Facebook auszukommen.

Daher: ich stehe nach wie vor auf professionelle Standalone-Geräte und solange die heutigen Rechner alle eher komplizierter und langsamer werden als einfacher und schneller, wird sich an meiner Einstellung wohl auch so schnell nichts ändern ;-)

Aber zurück zur Messung. Ich werde als Auswerte-Gerät also einen Rohde&Schwarz UPL Audioanalyser einsetzen. Der läuft zwar auch auf einem internen Rechner, ärgert mich aber weder mit Updates, noch mit Viren, Phishing-Mails und Logins und Passwörtern. So herrlich einfach und unkompliziert eben- so wie ich es mag :-)

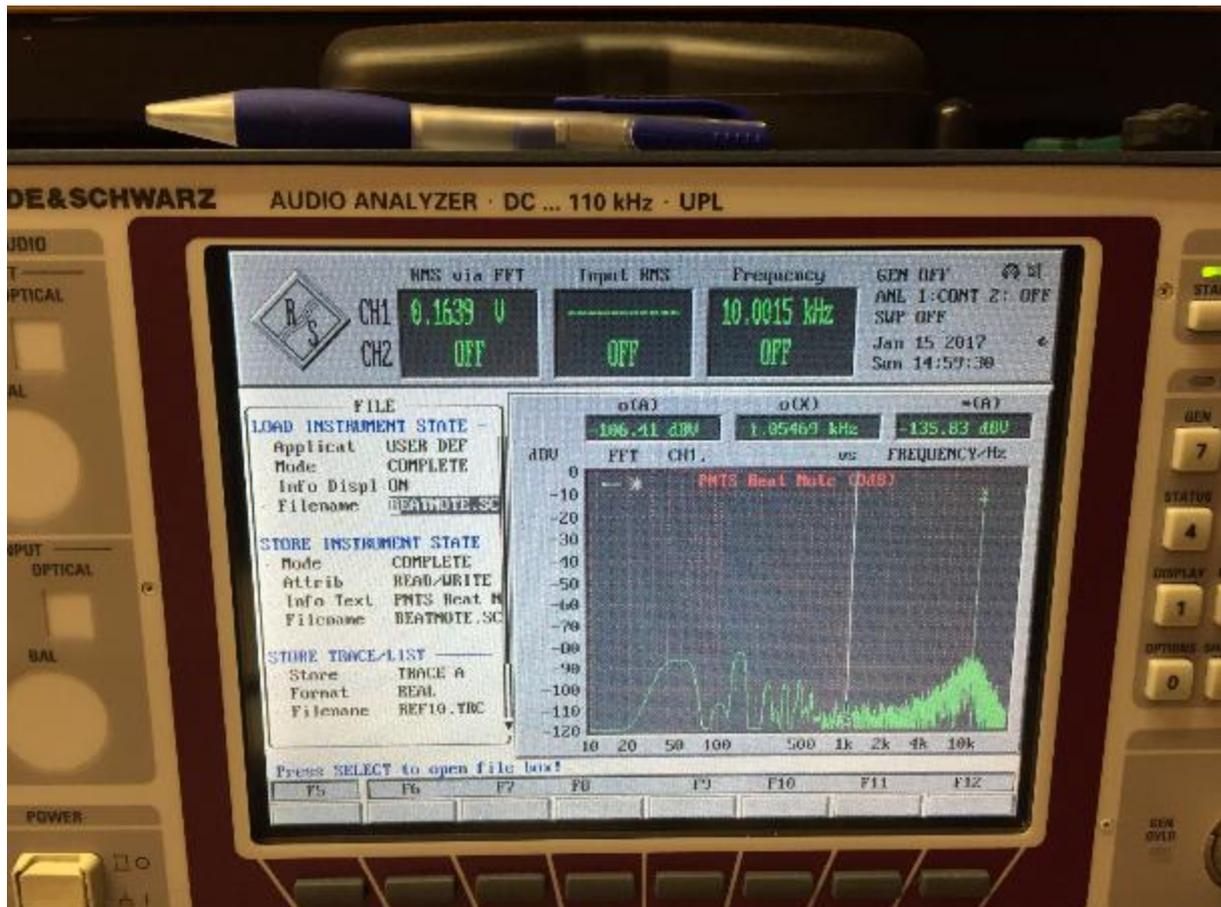


Abbildung 74: der Rohde&Schwarz UPL Audio-Analyzer

Der PNTS liefert als Ausgangssignal ja eine NF-Rauschspannung, die nun mit einem geeigneten Gerät analysiert und bestimmt werden muss. Doch wie geht das eigentlich?

Ich habe viele Versuche gebraucht und dabei tatsächlich auch viel über meinen Audioanalyser gelernt. Sogar so viel, dass ich irgendwann -mit Hilfe des Bastelkreises- festgestellt habe, dass die im R&S UPL verwendeten FFT Fensterfunktionen (also sowas wie Hamming, Hanning, Flot Top, usw.) nicht auf 1 normiert sind, sondern mit einem Korrekturfaktor umgerechnet werden müssen, wenn man die Einzelwerte (man nennt sie "FFT-Bins") aus der Grafik abliest.

Weil das alles so furchtbar interessant und verwirrend ist, schiebe ich hierzu mal ein eigenes Kapitel ein!

28 Window-Correction beim R&S UPL

Was wohl die Wenigsten der UPL-Benutzer wissen, ist, dass die grafische Ausgabe (also das FFT-Diagramm) nur für das RECTANGULAR-Fenster korrekt zur Y-Achsenbeschriftung passt, denn nur dieses ist auf die Verstärkung $v=1$ normiert!

Glaubt ihr nicht?

Ich auch erst nicht und hatte mir selber die beobachteten Pegelabweichungen der verschiedenen FFT-Fenster mit unterschiedlichen Rauschbandbreiten erklärt. Ist aber alles Unsinn, wie der schlaue Thomas aus dem Bastelkreis bemerkte und setzte mich damit wieder auf die richtige Spur. Die FFT-Bandbreite eines einzelnen FFT Bins ist einfach zu berechnen durch:

$$FFT \text{ Bin}_{Bandwidth} = \frac{Sample \ Rate}{FFT \ Length}$$

und beträgt beim R&S UPL in der Standardbetriebsart (analog 22kHz)

$$FFT \text{ Bin}_{Bandwidth} = \frac{48kHz}{8192} \approx 5,86Hz$$

Sehr schön wäre natürlich, wenn jeder FFT Bin nur genau 1Hz breit wäre, dazu brauchte man aber eine FFT-Länge von genau 48000. Ich weiß nicht, ob technisch sowas möglich ist, normalerweise sind die FFT-Längen immer etwas, das auf der Zahl 2 basiert, aber das ist auch nicht weiter schlimm: der Bandbreitenkorrekturfaktor für die spätere Berechnung wird $\overline{5,86Hz} = 2,42 \overline{Hz} \Rightarrow 7,67dB$ sein.

Schauen wir uns aber nun drei der verschiedenen FFT-Fenster an. Sie alle sind wirklich 5,86Hz breit, denn das Fenster hat ja nur Auswirkung auf die Darstellung und nicht die FFT-Zerlegung an sich. Die erfolgt in allen Fällen mit einer Länge von 8192 und damit 5,86Hz Bandbreite. Das galt es für mich erstmal, zu begreifen!

Wie kommt es dann also, dass ein 1kHz / 1Vrms Sinuston, den ich in den UPL einspeise, je nach gewähltem Bewertungsfenster in der geometrischen Aufaddition* der relevanten FFT-Bins nicht immer bei 1Vrms herauskommt?

* geometrische Addition = $\sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2 + \dots usw \dots}$

Dass das so ist, habe ich in einem Versuch mal ausprobiert.

Also 1Volt/1kHz rein in den UPL, nacheinander die Bewertungsfenster

RECTANGULAR

FLAT TOP

und

HANNING

ausgewählt, mit dem Cursor 15 FFT-Messwerte um den Hauptpeak herum abgelesen, geometrisch addiert und dann die Ergebnisse ausgerechnet. Und gestaunt!

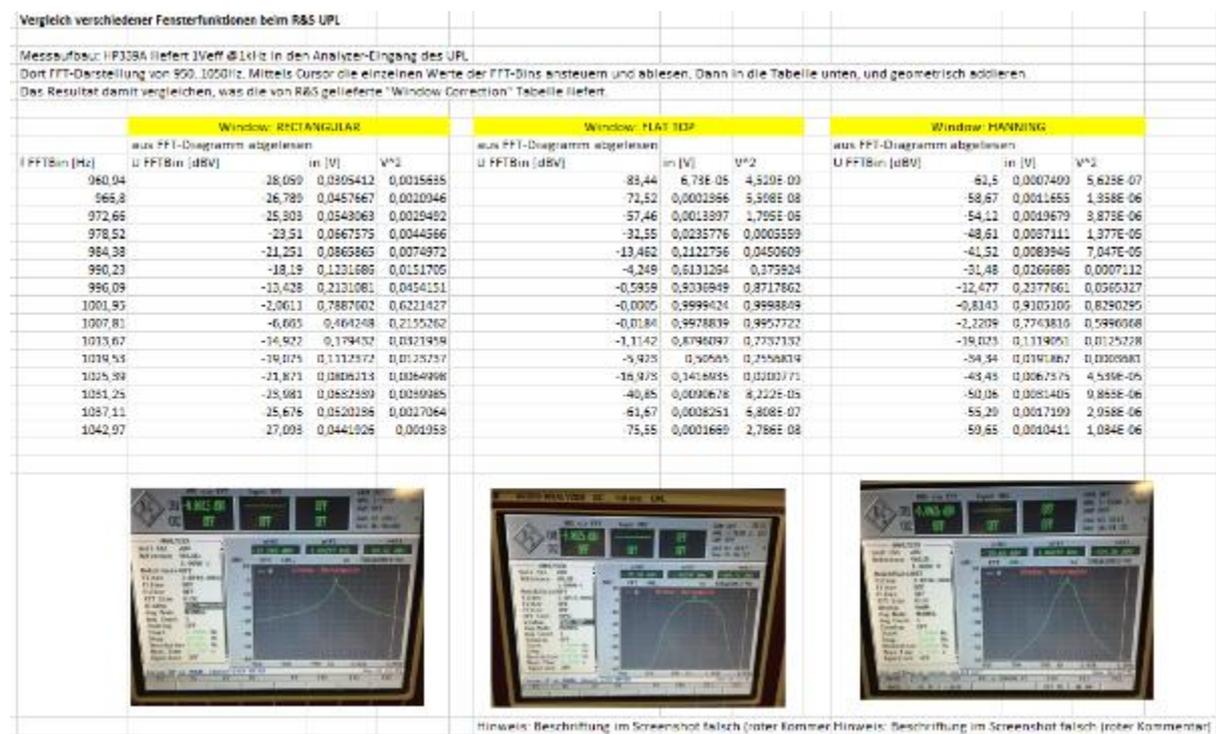


Abbildung 75: Test mehrerer FFT-Bewertungsfenster beim R&S UPL

Während die Anzeige "Urms via FFT" immer brav die 0dBV (das sind ja 1Veff) anzeigt, kommt aus der Rechnung was komplett anderes raus:

RECTANGULAR	U RMS berechnet aus FFT-Bins	-0,1030871 dBV
FLAT TOP	U RMS berechnet aus FFT-Bins	6,3734371 dBV
HANNING	U RMS berechnet aus FFT-Bins	1,7579598 dBV

Das ist ja der Wahnsinn! Nur das RECTANGULAR (also Rechteckfenster) scheint auf den Wert $v=1$ normiert zu sein, alle anderen erzeugen eine Verstärkung!

Welche das genau ist, liefert mir der treue R&S Customer Service in einer Email auf meine Anfrage:

Window Correction It. Email R&S Customer Service		Vr	Vr als dB
FLATTOP	2,083543754	6,3760525	
BLACKMANN HARR	1,41575158	3,0197411	
HANNING	1,224744089	1,760907	
HAMMING	1,167401167	1,3444025	
RIFE VINC 1	1,394433187	2,8879542	
RIFE VINC 2	1,519868234	3,6361188	
RIFE VINC 3	1,620657214	4,1938233	

Abbildung 76: Window Correction Wert für den R&S UPL

Interessant: drückt man die linearen Faktoren als "dB" aus, komme ich fast auf das $1/100$ tel dB genau auf die von mir ausgemessenen Umrechnungsfaktoren in der Tabelle auf der letzten Seite! (vergleiche die grün und blau hinterlegten Felder).

Ich bin also definitiv auf dem richtigen Weg und finde für das von Bernd für Phasenrauschmessungen empfohlene FLAT-TOP Bewertungsfenster den nächsten Korrekturfaktor: nämlich 6,37dB!

29 Weitere Korrekturfaktoren

Die Hürde mit den verschiedenen, nicht auf 1 normierten Bewertungsfenstern hat mich tatsächlich Wochen gekostet! Einige der anderen Korrekturfaktoren zu ermitteln, war hingegen leichter.

- **Seitenbandrauschen**

Weil die vom PNTS gelieferte NF prinzipbedingt das Phasenrauschen beider Seitenbänder enthält, müssen wir vom erhaltenen Endwert 3dB abziehen (halbe Leistung)

- **AM/FM-Rauschen**

Wie ich von Jörn lerne, muss man auch zwischen Amplituden- und Frequenzmoduliertem Rauschen unterscheiden. Laut seiner (übrigens hervorragend zu lesenden) Laborberichte kann man davon ausgehen, dass AM und FM in gleichen Teilen vorkommen; d.h. 50:50%. Da wir nur den FM-Teil wissen wollen, zieht man die "falschen 50%" hier ebe wieder ab: also ebenfalls 3dB.

- **Gleiche-Quellen-Prinzip**

Wenn man den Fall hat, dass der Referenzoszillator eine fast identische Rauschperformance hat wie der Prüfling (z.B. wenn man zwei baugleiche Oszillatoren hat), dann darf man vom Endergebnis weitere 3dB Rauschleistung abziehen. Der Grund ist, dass man dann davon ausgeht, dass beide Quellen zu gleichen Teilen für die gemessene Rauschleistung verantwortlich sind und eine Quelle alleine entsprechend nur die Hälfte der angezeigten Rauschleistung erzeugt. Bei uns wenden wir das aber erstmal nicht an. Wir gehen davon aus, dass unsere Referenz deutlich rauschärmer ist als das Prüfobjekt und deshalb der Rauschbeitrag zu 100% vom Prüfling kommt und nicht der Referenz.

30 Übersicht der Korrekturfaktoren

Was aber muss ich nun machen, damit ich mit einem R&S UPL eine korrekte Ausgabe in "dBc/ \overline{Hz} " hinbekomme?

Zuerst muss ich die sogenannte "BeatNote" messen. Also das, was meine 0dBc sind. Dazu schlieÙe ich den PNTS an, verstimme ich einen der beiden Oszillatoren (entweder die Referenz oder den Prüfling, das ist egal) um einen so großen Betrag, dass ihn die PLL nicht mehr fangen bzw. ausgleichen kann und es eine Schwebung entsteht.

Beispiel:

Referenz: 10, 000 000 MHz

DUT: 10, 010 000MHz

Damit ergibt sich ein Schwebungston von ziemlich genau 10kHz mit -und darauf kommt es an!- genau 0dBc Pegel.

Diesen messen wir mit dem Audiovoltmeter. Bei mir hatte der für den aktuellen Test genau $U_{BN}=291mV_{rms}$. Das entspricht für diese Messung also nun genau unseren 0dBc. Ich habe die Verstimmung noch etwas variiert und dabei festgestellt, dass auch z.B. ein 1kHz-Ton genau dasselbe Ergebnis liefert ($291mV_{rms}$). Scheint also nicht so kritisch zu sein, welche Schwebungsfrequenz man genau erzeugt. Hauptsache ist, dass die PLL nicht gegenregeln kann und überhaupt ein Schwebungston im kHz-Bereich entstehen kann.

Achja: diesen Schwebungston misst man natürlich in der "0dB"-Stellung des PNTS, denn sonst hätte der $U_{BN}=291mV$ -Ton in der 60dB-Stellung einen Pegel von 291V und man würde einen elektrischen Schlag kriegen ;-)

Also: die Spannung für die "Beat Note" tragen wir vorne ein...

PNTS Operation Mode	Beat Note (10kHz für 0dBc)	1. Correction Amp am PNTS	2. Correction T-Window (Flat Top)	3. Correction T-Bandwidth 5,88	4. Correction AM/FM-Noise	5. Correction DSB->SSB	TOTAL Vref Correction df im UPL
0dB	0,291 Veff	0 dB	6,376052 dB	7,678513 dB	3 dB	3 dB	20,0546 dB - 2,92834 V
30dB	0,291 Veff	30 dB	6,376052 dB	7,678513 dB	3 dB	3 dB	50,0546 dB - 92,6022 V
60dB	0,291 Veff	60 dB	6,376052 dB	7,678513 dB	3 dB	3 dB	80,0546 dB - 392,934 V

Abbildung 77: Die ganzen Korrekturfaktoren für die korrekte Skalierung

... und lassen Excel die restlichen Korrekturfaktoren* berücksichtigen und den Endwert ausrechnen.

Hier kommt genau 2,93Veff ($U_{BN}+20,546dB$) heraus. Diesen Wert tragen wir in unserem UPL im DISPLAY-Menü als Referenzwert ein und wählen als Y-Skalierung die Einheit "Vr".

Wenn man genau so verfährt, erhält man beim UPL tatsächlich eine für den aktuellen PNTS-Messaufbau in "dBc/ \overline{Hz} " geeichte Skala!

Glaubt ihr nicht?

Ich hatte gehofft, dass Ihr das sagt.

* Stellung 0dB: $U_{BN}+20,0546dB$;

Stellung 30dB: $U_{BN}+50,0546dB$;

Stellung 60dB: $U_{BN}+80,0546dB$

31 Erste Messung!

Meine ersten Erfahrungen habe ich gesammelt, indem ich die Ergebnisse des PNTS mit einem "amtlichen" PhaseNoise Test-System verglich. Weil ich leider keinen R&S FSUP oder einen Wenzel BP1000 oder ähnliche HF-Luxuskarossen hier im Keller stehen habe, bleibt mir nur der Griff zu meinem R&S FSEB30 Spectrum Analyzer in Verbindung mit der Rohde&Schwarz Phasenrausch-Mess-SW FSE-K4.

Diese Lösung sollte "amtliche" Messwerte generieren; hat jedoch den Nachteil, dass sie durch eine -prinzipbedingt- relativ schlechte Dynamik nicht besonders empfindlich ist. Der Prüfling muss also schon gehörig "gut rauschen", damit man damit deutlich über dem NoiseFloor des Messsystems ist und die Messergebnisse eindeutig dem Prüfling zuordnen kann (und nicht dem Messgerät selber).

Anstatt also einen guten Signalgenerator mit Whiskey zu ertränken, um das Rauschen zu erhöhen, kommt mir die supertolle Rauschperformance des R&S CMS52 Radiocommunication Testers in den Sinn! Der ist tatsächlich "schlecht genug", um hier als verrauschte Signalquelle zu dienen. So doof das klingt, aber es wird funktionieren!

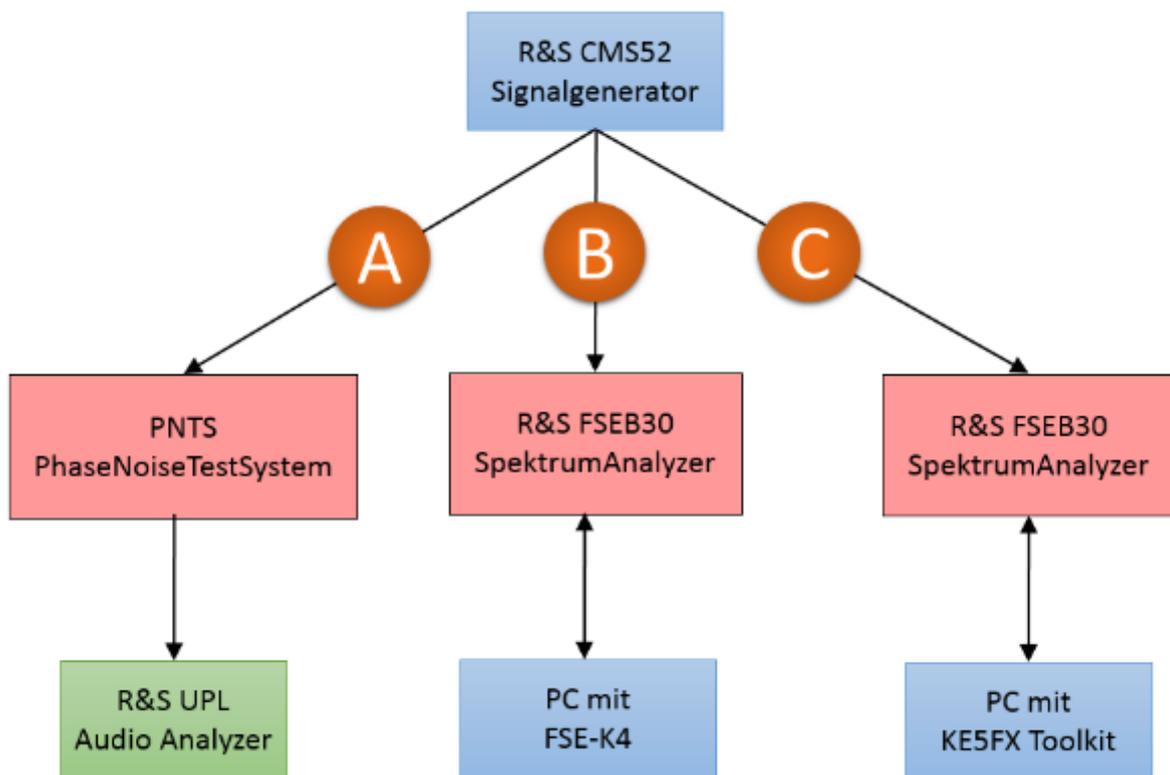
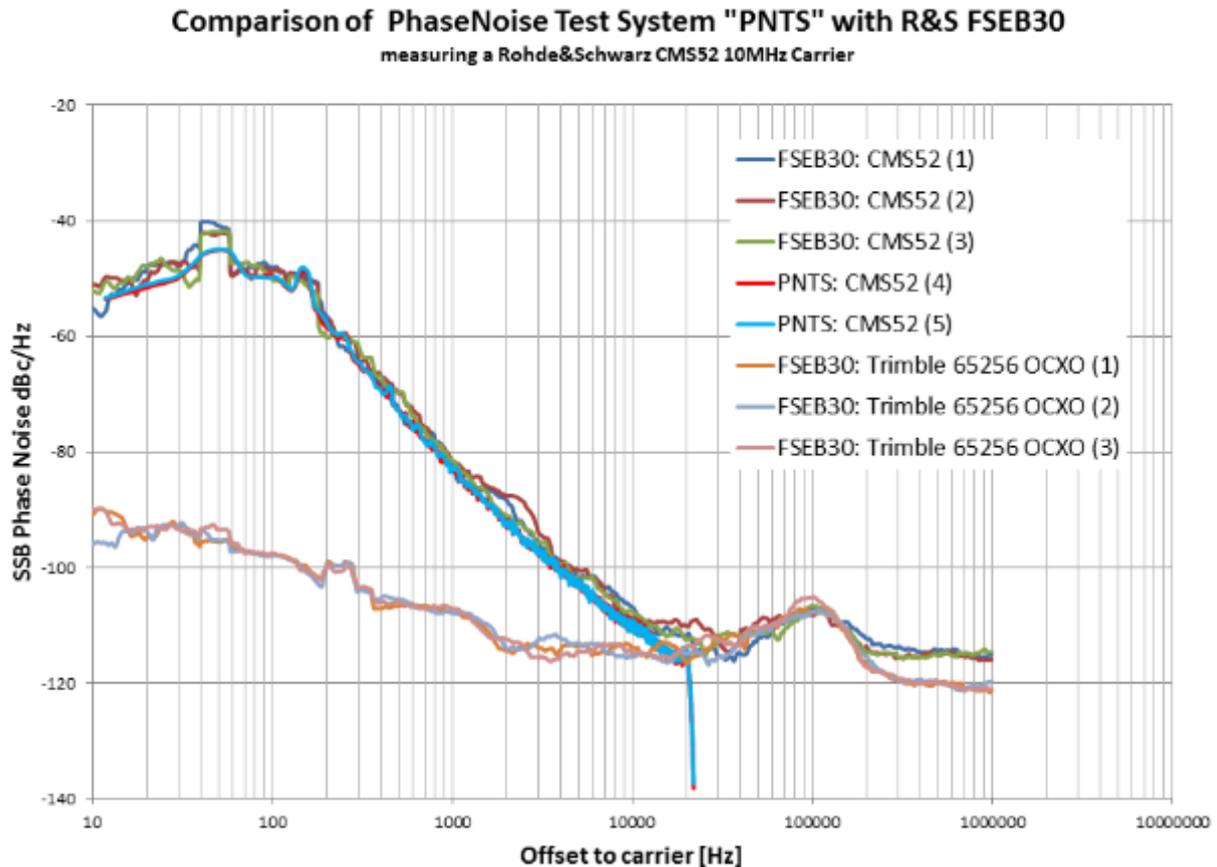


Abbildung 78: Phasenrausch-Vergleichsmessung

In einem ersten (gescheiterten) Versuch habe ich bewiesen, dass sowohl das R&S FSE-K4 als auch das -zu recht!- sehr beliebte KE5FX Toolkit identische Messwerte liefern; ich mich also darauf beschränken kann, nur Messung A und Messung C durchzuführen.

Genau das tue ich also und komme auf das folgende Bild:

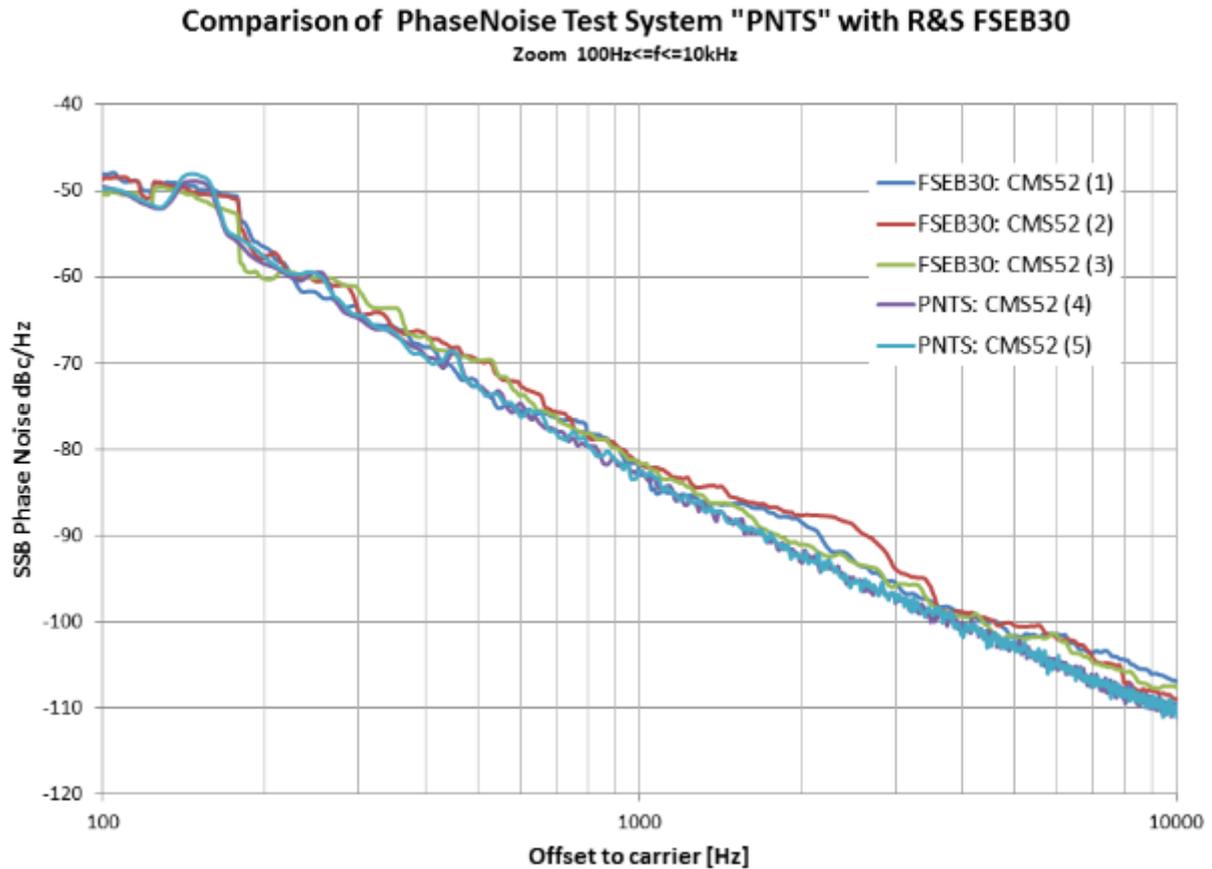


Weil wir es mir Rauschen zu tun haben, habe ich die Messungen alle mehrmals gemacht, um einen ersten Eindruck von der statistischen Schwankungsbreite zu gewinnen. Die untersten drei Grafen ("FSEB: Trimble 65256 OCXO") stellen dabei die Systemgrenze dar, bis zu der der verwendete FSEB30 noch messen kann. Dazu habe ich einen -hinreichend guten- 10MHz OCXO von Trimble verwendet, der -aus Sicht des Spekis- so gut wie nicht rauscht. Alles das, was man nun noch sieht, ist quasi die Messgrenze des FSEB30. Solange man zu dieser Grenze bei seinen Messungen mindestens 10dB Abstand einhält, kann man den Messwerten noch hinreichend gut vertrauen. Je näher man der Systemgrenze allerdings kommt, desto höhere Abweichungen sind möglich. Das muss man vorher schonmal wissen.

Dann habe ich die Messungen mit dem CMS52 als Prüfling gemacht: die ersten drei Grafen zeigen das Ergebnis der Messung mit dem FSEB30 und der KE5FX Phasenoise-Mess-SW. Die beiden Grafen "PNTS: CMS52" zeigen die Messung, die der PNTS mit dem UPL als Audioanalyzer ausspuckt. Bei beiden Systemen habe ich die Traces exportiert und in dies gemeinsame Excel-Diagramm eingefügt.

(Die bei 22kHz stark abfallende Kurve liegt an dem bewusst eingeschalteten Bandfilter im UPL (10Hz..22kHz) und kann ignoriert werden).

Gucken wir uns nochmal speziell den Bereich von 100Hz..10kHz an



Wir sehen erstmal eine ziemlich gute Übereinstimmung! Der PNTS mag vielleicht noch generell 1 oder maximal 2dB unter der Messkurve des FSEB30 liegen, könnte also möglicherweise noch eine kleine Systemabweichung haben. Trotzdem: mit dieser Übereinstimmung bin ich grundsätzlich schon erstmal sehr zufrieden! Es zeigt nicht zuletzt, dass die Bestimmung meiner Korrekturfaktoren so ganz verkehrt vermutlich nicht war.

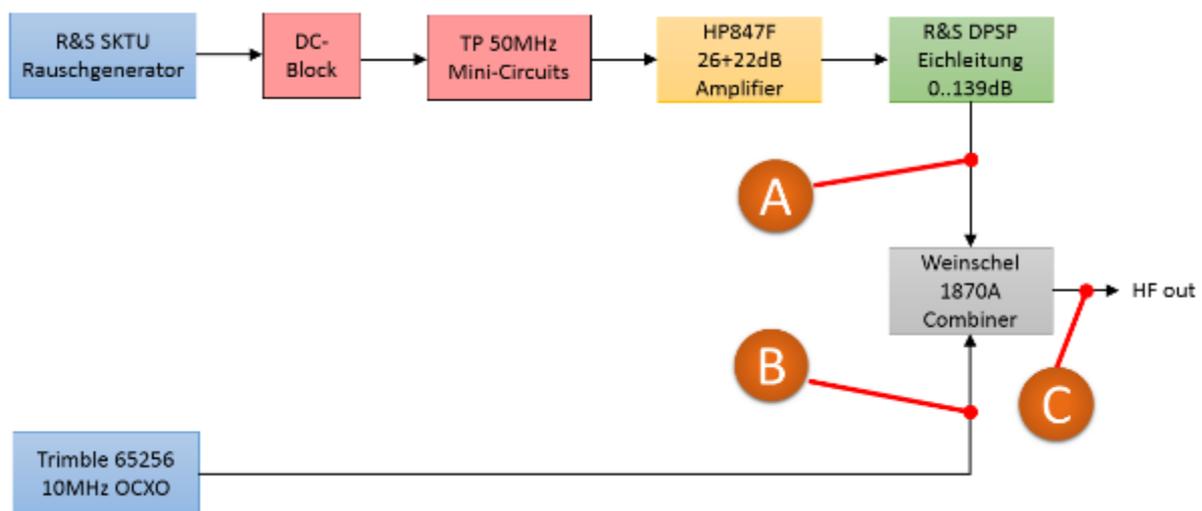
32 Messung mit WhiteNoise

Bastelfreund Jörn hat ebenfalls einen guten Tipp, wie man einen Phasenrauschmessplatz überprüfen kann. Die Idee ist, einem sauberen 10MHz-Träger absichtlich einen gewissen Betrag Phasenrauschen zu überlagern, der dann ein gezielt phasenrausch"verseuchtes" Signal ergibt, das man auch nachrechnen kann.

Das ist ein super Ansatz und nach etwas Wühlen und Kramen in meinem Regal unter der Kellertreppe finde ich

- einen Rohde&Schwarz SKTU Rauschgenerator
- einen HP 8744F Preamplifier
- einen Weinschel 1870A resistive Combiner
- ein 50MHz Tiefpassfilter (Mini-Circuits)

Daraus stöpselte ich mir folgenden Aufbau zusammen:



Zur Beschreibung:

Der obere Zweig liefert an Schnittstelle (A) das Rauschsignal, der untere an (B) das 10MHz Trägersignal. Der Combiner addiert alles zusammen und liefert an C ein definiert verrauschtes 10MHz-Signal, das wir dann mit dem PNTS messen können.

Der Rauschzweig ist deswegen so "kompliziert", weil das Rauschsignal schon sehr kräftig sein muss, damit es mit einem SpektrumAnalyzer auch gegemessen werden kann. Dazu muss es verstärkt werden; denn der SKTU kann längst nicht so viel "Düse" liefern, wie wir am Ende brauchen. Zur Verstärkung dient der HP8744F PreAmp, der mit zwei hintereinandergeschalteten PreAmp-Stufen insgesamt 48dB Verstärkung schafft. Damit er damit nicht zu viel unnötige Energie verbläst, wird das 1..1000MHz Rauschsignal des SKTU vorher mit einem 50MHz Tiefpass (2x MiniCircuits PLP-50 in Reihe; Sperrdämpfung @100MHz >100dB) im Frequenzbereich begrenzt. Ein Stufenabschwächer (R&S DP5P) kann noch einmal dazu benutzt werden, das Rauschsignal definiert im Pegel anzupassen.

Als 10MHz-Signalgenerator benutze ich meinen Trimble 65256 OCXO. Der ist für diesen Messaufbau bereits so "hinreichend rauscharm", so dass er hier quasi als "rauschfrei" angenommen werden kann. Auch wenn Bernd mir immer verbieten will, diesen OCXO zu nutzen

(er meint, er sei als OSC für Anfänger nicht geeignet), muss ich den erstmal benutzen, denn er ist der beste, den ich zurzeit habe und außerdem möchte ich jetzt nicht noch eine weitere Baustelle parallel aufmachen und mir erst noch einen rauscharmen OCXO bauen!

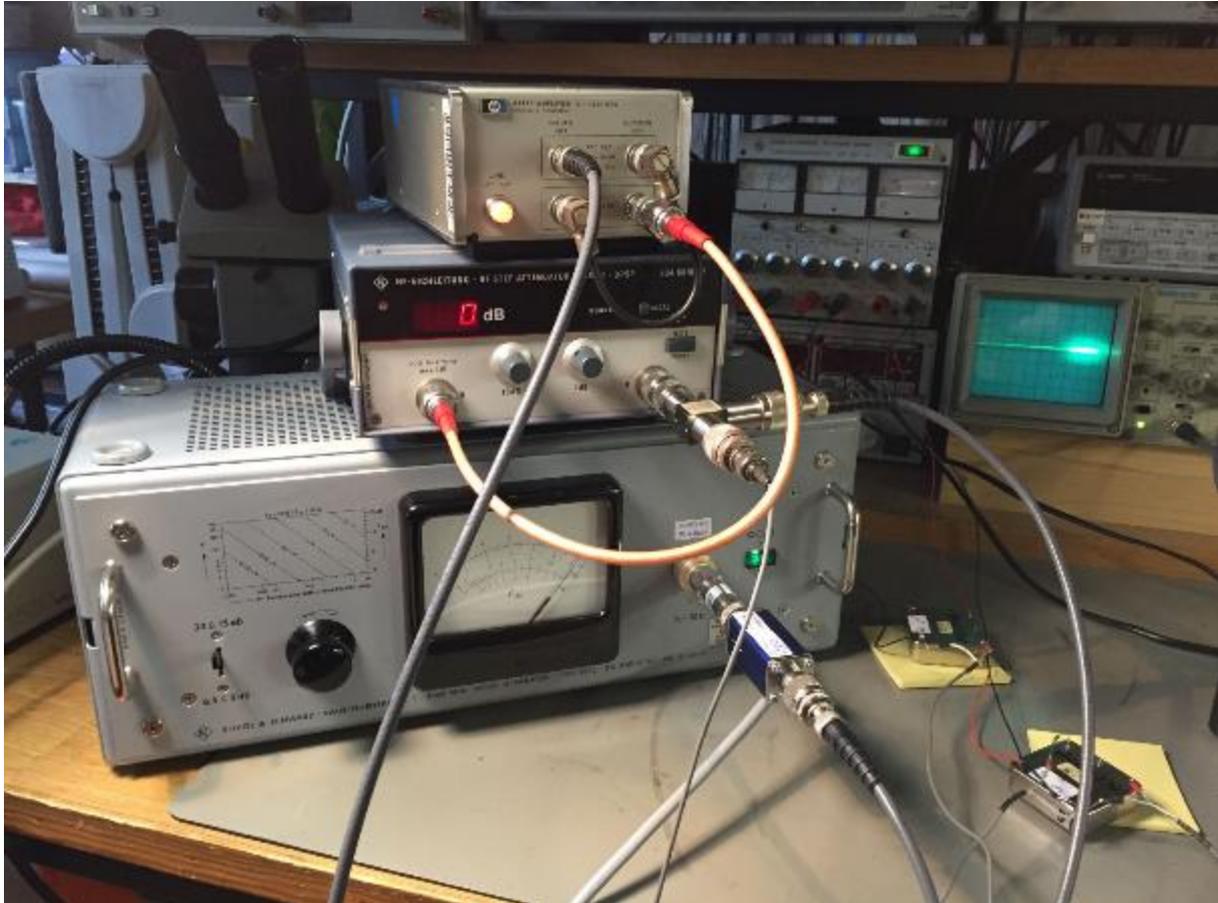


Abbildung 79: Messaufbau in der Realität

Dass es auch so geht, wird sich gleich zeigen.

Es geht los:

Zuerst messe ich die Signale von Zweig (A) und Zweig (B) hinter dem Combiner; also an Schnittstelle (C). Da ergibt sich:

10MHz-Signal: +0,62dBm gemessen mit R&S NRVS und NRV-Z51 Messkopf
Noise: -116,1dBm/Hz gemessen mit Phasenoise-Marker am R&S FSEB30

Damit würde sich also rechnerisch folgendes Phasenoise ergeben:

Noise:	-116,1 dBm/Hz
Generator:	- (+) 0,62 dBm
Ergebnis:	<u>- 116,72 dBm/Hz</u>

Ich starte meinen PNTS, messe die BeatNote zu 291mV, rechne mir den dafür korrekten UPL Kalibrierfaktor aus (2,93V) und messe. Nach 128 Mittelwerten lese ich am Cursor ab:

-116,71 dBm/Hz!

Unglaublich! Eine Übereinstimmung von 0,01dB. Das ist eigentlich schon ZU gut und ich beginne, an meiner eigenen Messung zu zweifeln. Am Liebsten wäre es mir, wenn ich diesen Messwert nun auch noch mit dem KE5FX Toolkit oder dem R&S FSE-K4 Phasenoise-Tool bestätigen könnte. Also probiere ich es!

Leider stelle ich kurz darauf fest, dass -selbst wenn ich den Rauschgenerator volle Pulle aufdrehe- das gelieferte Phasenoise nicht ausreicht, um den Eigen-Noisefloor des Analyzers so weit zu überwinden, dass ich mindestens 10dB Abstand zur Systemgrenze (Eigenrauschen) habe und damit wirklich die Ergebnisse des Prüflings ablese und nicht die des Eigenrauschen des Messgeräts.

Also strenge ich das Hirn an. Wie kriege ich das besser hin?
ganz einfach: den Pegel des 10MHz-Signals verkleinern; damit kann ich am Speki eine empfindlichere Einstellung finden (Main Attenuator) und das Noise-Signal rückt näher an den Träger heran (Phasenoise-Wert wird "schlechter").

Gesagt, getan. Ich krame einen 20dB Abschwächer aus der Kellertreppenkiste und erzeuge somit an Schnittstelle (C) genau -19,6 dBm.

Das Rauschsignal messe ich vorsichtshalber ebenfalls nochmal und ermittle diesmal -116,6 dBm/Hz, also etwa 0,5dB mehr. Macht nix, bei Rauschmessungen ist ein präziser und stabiler Wert sowieso nur mit (sprichwörtlich) unendlich langen Integrationszeiten zu erreichen.

Nun wieder die Rechnung:

Noise:	-116,6 dBm/Hz
Generator:	(-) 19,6 dBm
Ergebnis:	<hr/> - 97,0 dBm/Hz

Ich starte mein KE5FX-Tool und messe erstmal den eigenen Noisefloor (Rauschgenerator abgeschaltet; blaue Kurve). Dann schalte ich den Rauschgenerator zu, wähle mit dem Cursor willkürlich einen Abstand von 1kHz zum Träger und messe -violà- -96,1 dBc/Hz! Super! Das sind weniger als 1dB Abweichung zur Rechnung!

Also ran mit dem Signal an den PNTS. Hmmm...-20dBm....eigentlich liegt das -selbst mit aktiviertem Vorverstärker- leider deutlich unter den -3dBm Mindestpegel, den Bernd zum PNTS angibt. Sollte ich es trotzdem probieren?

Na klar. Aber zuerst erzeuge ich eine neue BeatNote mit einem SME03 Generator in 10kHz Abstand. Ich lese (statt der sonst gewohnten 291mV) nur noch 91mV NF-Signal ab und errechne mir damit einen neuen UPL Kalibrierfaktor.

Dann starte ich die Messung, lasse 128x mitteln, und:

-97,74 dBm/Hz! Juchuuu!

Zu guter Letzt schnappe ich mir meinen Rigol DSA815, aktiviere dort auch den Phasenoise-Marker, speise das verrauschte 10MHz-Signal ein und messe:

-97,91 dBm/Hz!

Damit habe ich nun folgende Phasenoise-Messwerte:

	Berechnet	KE5FX Tool an FSEB30	PNTS	Rigol DSA815 Noise Marker
Messwert [-dBm/Hz]	-97,0	-96,1	-97,7	-97,9
Abweichung zur Rechnung	0 dB	+0,9 dB	-0,7 dB	-0,9 dB

Bastler Eric hat Recht: seiner Meinung nach ist alles das, was bei Phasenoise-Messungen in der Reproduzierbarkeit innerhalb 1..2dB beieinander liegt, sei ein super Wert. Ich möchte nicht widersprechen, denn es war eine schwere Geburt!

33 PNTS mit 30dB und 60dB

Wir haben nun einen Beweis für den Modus "0dB" geführt, aber noch keine für 30dB und 60dB. Nun, direkt kann ich das leider nicht mehr prüfen, denn meine Vergleichsmöglichkeiten (Spekis mit NoiseMarker) schaffen ja in der Empfindlichkeit selbst den 0dB-Bereich des PNTS nur mit "Ach und Krach". Ihnen bei derart niedrigen Bereichen unter -100dBc noch valide Messwerte entlocken zu wollen, ist messprinzipbedingt leider nicht möglich.

Allerdings ist das Restrisiko für die 30dB und 60dB-Bereich nur sehr gering: alle durchlaufenden Schaltungsteile im PNTS sind nahezu gleich- bis auf die zusätzlich eingeschleiften NF-Verstärkerstufen. Die haben wir aber bereits gemessen und kennen deren Verstärkung (siehe Kapitel 24). Setzen wir diese Verstärkungswerte einfach in die Liste der Korrekturwerte mit ein (siehe Abbildung 77) und berechnen uns damit die entsprechenden UPL Korrekturfaktoren.

Die Chance, dabei noch was Grundlegendes falsch zu machen, ist nur sehr gering. Fazit ist also: wenn wir den 0dB-Bereich des PNTS verifizieren erfolgreich konnten und ebenso die korrekte Verstärkung der HF- und NF-Verstärkerstufen (siehe Kapitel 24), können wir dieses Vertrauen getrost auf die anderen beiden Messbereiche (30 und 60dB) übertragen.

34 System noise floor (Teil 1)

Jetzt, wo ich über eine kalibrierte Anzeige des NoiseFloors verfüge, kann ich auch die Messung machen, die Bernd in seinem Manual vorschlägt: die Ermittlung des System Noise floors.

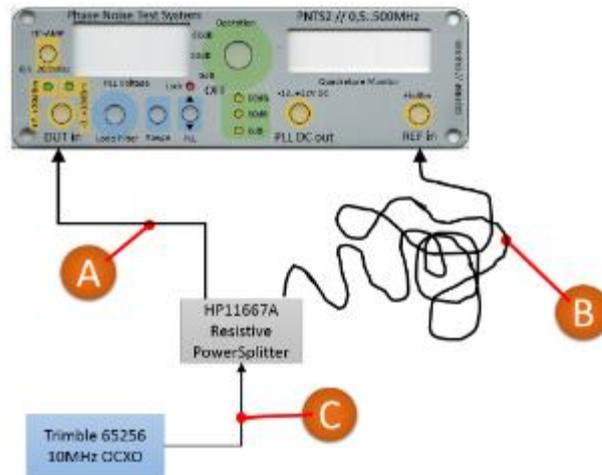


Abbildung 80: Messaufbau für System Noisefloor-Test

Dazu schnappt man sich einen guten Oszillator und teilt sein Ausgangssignal in zwei Stränge auf (Power Splitter). Ein Signal speist den DUT-Eingang des PNTS. Das andere Signal wird elektrisch um genau 90° verzögert und erst dann auf den REF-Eingang des PNTS gegeben. Ergebnis ist, dass der PNTS stets in Quadratur zu sich selbst ist und das minimal mögliche Ausgangssignal liefert (weil Referenz- und DUT-Signal im Phasenrauschen zueinander identisch sind und sich damit (theoretisch) ausmitteln müssten).

Das Verzögern macht man am Besten mit einem einfachen Koaxialkabel und nach etwas Rechnerei bekomme ich heraus, dass ein normales Laborkabel mit einem Verkürzungsfaktor von 0,66 etwa 18° Verschiebung pro Meter bringt (bei $f=10\text{MHz}$).

PARAMETER	
Frequenz:	10 MHz
Wellenlänge (Luft):	30 m
Periodendauer:	0,0000001 s
	100 ns
Gesucht: Laufzeit für	90 Grad Phasenverschiebung
Verzögerung ist also:	25 ns
Verkürzungsfaktor Koaxkabel:	0,66
Länge Umwegleitung:	4,95 m
LEGENDE	
Wert eingeben	
Ergebnis	

Abbildung 81: Excel-Tool zur Laufzeitberechnung

Um 90° zu kriegen, rechnet mir mein Excel genau 4,95m aus. Ob dieser Wert dann in der Praxis auch der sein wird, den man wirklich braucht, sei erstmal dahingestellt. Andere Einflüsse werden sicher auch noch Einfluss auf diesen Wert haben (HF-Amp, Power Splitter, usw.), daher schweigt sich Bernd in seiner Anleitung über den "korrekten" Wert auch aus, aber es ist erstmal eine Größenordnung, mit der man starten kann. Durch An- und Abstecken verschieden langer Laborkabel werde ich schon irgendwie eine Kombination finden, die möglichst dicht an 90° kommt.



Abbildung 82: Messung der Phasenverschiebung am NWA

Und schon wird es wieder haarig.

Ich finde ein Kabel, das -laut Netzwerkanalyzer- knappe 90° bei 10MHz erzeugt. Die Länge kommt in etwas mit dem Berechneten hin, so dass ich mich schon (zu früh) gefreut habe. In Verbindung mit der Laufzeit aus dem vorgeschalteten Powersplitter HP11667A komme ich sogar fast ganz exakt auf die benötigten 90° Phasenverschiebung. Zumindest erst einmal in der Theorie.

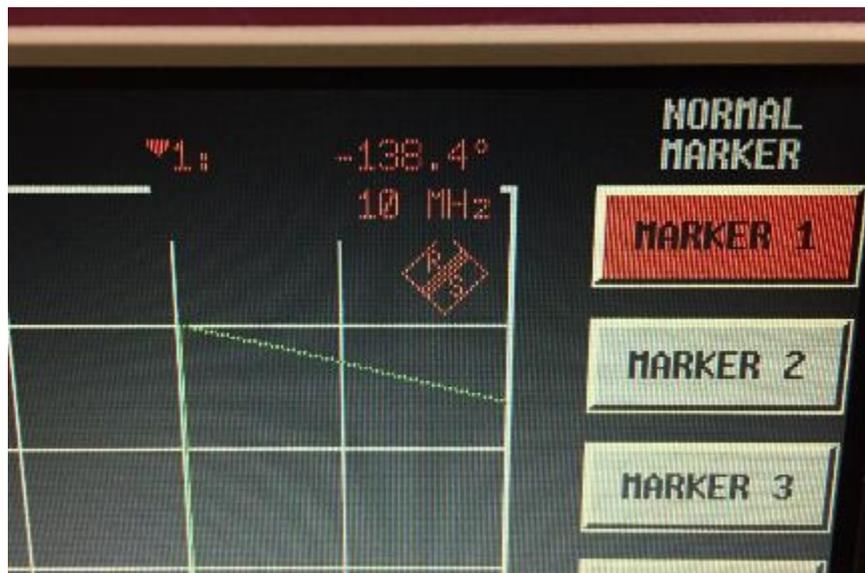


Abbildung 83: knapp 140° - das ist etwas zu viel des Guten



Abbildung 84: schon viiel besser!

Doch ich erlebe mal wieder ein Hindernis: mein Testoszillator liefert +6dBm als Ausgangssignal (Schnittstelle (C)). Die werden im Splitter aufgeteilt und pro Zweig (A) und (B) bleiben konstruktionsbedingt dabei 6dB hängen. Ich messe pro Zweig also etwa 0dBm- das aber auch nicht "wirklich", denn der PNTS scheint keinen idealen 50Ohm-Abschluss darzustellen, so dass die letztendlich erreichten Pegelverhältnisse dem HP1667A in puncto Präzision in keinsten Weise gerecht werden. Aber egal, Fakt ist: bereits 0dBm sind eindeutig zu wenig- zumindest nach den Angaben in Bernds Manual.

Ein erster Versuch, das Signal vorher mit meinem HP8744F aufzupäppen, scheitert kläglich. Der daraufhin gemessene Noisefloor ist jenseits von gut und böse. Warum, weiß ich nicht. Ich dachte immer, dass sich das Rauschen eigentlich gegenseitig rausmitteln müsste, weil es ja von ursprünglich demselben Oszillator stammt- selbst wenn es unterwegs von einem rauschenden Verstärker etwas "versaut" wird. Scheint aber nicht so zu sein, denn anders kann ich mir das nicht erklären. Vielleicht Phasenverzerrungen? Amplitudenverzerrungen? Derart, dass es sich dann doch wieder nicht gegenseitig kompensiert? Immerhin reden wir von Pegeln 170dB unter dem Träger. Zumindest möchte ich das. Ob mit der PNTS dieses Vergnügen gönnen wird, werden wir noch sehen.

35 Zurück ans Reißbrett

Rückschläge dieser Art kenne ich bei meinem Phasenoise-Projekt ja schon. Das hat mir stets vor Augen geführt, nicht zwei Schritte auf einmal zu machen, sondern auch einfach Vieles zu hinterfragen. Die Messbedingungen beispielsweise, nach denen der Autor des PNTS folgenden (traumhaften!) Noisefloor erreicht hat:

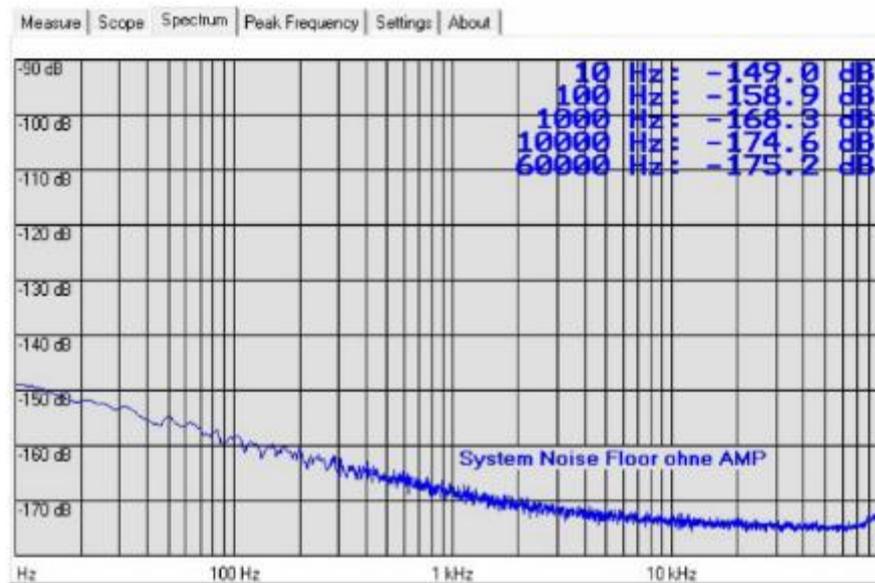


Abbildung 85: System Noise Floor beim PNTS-Entwickler (Quelle: PNTS Manual, Seite 17, DG4RBF)

Ich erfahre auf Nachfrage im Bastelkreis, dass für diese Messung beispielsweise als Powersplitter nicht ein HP11667A, sondern ein einfacher (im Gegensatz zum HP11667 darf ich sicher sagen: absolut "billiger"!) Mini-Circuits ZFSC-2-11 verwendet wurde. Das ist so ein Ding:

Coaxial
Power Splitter/Combiner

2 Way-0° 50Ω 10 to 2000 MHz

Maximum Ratings	
Operating Temperature	-55°C to 100°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Power Input (as a splitter)	1W max.
Internal Dissipation	0.125W max.

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

Coaxial Connections	
SUMPORT	3
PORT 1	1
PORT 2	2

Features

- very wideband, 10 to 2000 MHz
- low insertion loss, 0.6 dB typ.
- excellent amplitude unbalance, 0.1 dB typ.
- excellent phase unbalance, 1 deg. typ.
- rugged shielded case

Applications

- cellular
- GPS
- satellite distribution

ZFSC-2-11+

BNC version shown
CASE STYLE: K18

Connectors	Model
BNC	ZFSC-2-11+
SMA	ZFSC-2-11-S+
N-TYPE	ZFSC-2-11-N+

BRACKET (OPTION "B")

RoHS Compliant
The above identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

Abbildung 86: Mini-Circuits ZFSC-2-11 Datenblattauszug

Den habe ich zwar gerade nicht da, aber dafür den hier:

Coaxial Power Splitter/Combiner

2 Way-0° 50Ω 1 to 650 MHz

Maximum Ratings

Operating Temperature	-55°C to 100°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Power Input (as a splitter)	1W max.
Internal Dissipation	0.125W max.
Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.	

Coaxial Connections

SUM. PORT	2
PORT 1	1
PORT 2	3

Features

- wideband, 1 to 650 MHz
- excellent isolation, 35 dB typ.
- excellent amplitude unbalance, 0.1 dB typ.
- excellent phase unbalance, 1.0 deg. typ.
- rugged shielded case

Applications

- VHF/UHF
- instrumentation
- communications systems

ZMSC-2-1W
ZMSC-2-1W+



HT-Series
Light Spot
SMA Mount
From \$24.25

CASE STYLE: M21

Connectors	Model	Price	Qty.
SMA	ZMSC-2-1W(+)	\$54.95	(1-8)
BRACKET (OPTION "B")		\$5.00	(1+)
BRACKET (OPTION "BR")		\$1.50	(1+)

+RoHS Compliant

The +RoHS identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

Electrical Specifications

Abbildung 87: Mini-Circuits ZMSC-2-1 (Datenblattauszug)

Im Vergleich zu meinem Präzisions 18GHz HP11667A ziehe ich im ersten Moment die Augenbrauen hoch. Mit so einem schönen "Consumer-Teil" soll ich bessere Ergebnisse erreichen als mit meinem Protze-Luxus-HP, für den ich noch gebraucht mehrere hundert Euronen auf den Tisch blättern musste?

Ich tue dem guten Teil Unrecht: dieses kleine Dingsi hat mir schon oft bei IP3-Messungen geholfen, wenn es um gute Isolation und Entkopplung geht und da lässt er den etwa 20x so teuren HP11667A locker im Regen stehen! Außerdem gewinne ich bei diesem Teil 3dB pro Zweig, denn der insertion loss ist beim mini-circuit nur 3dB und beim "tollen" HP 6dB (konzeptbedingt). Und diese 3dB kann ich hier gut gebrauchen!

Glaube ich jedenfalls.
Glauben?

Gutes Wort, hat auf jeden Fall seine Berechtigung- nur nicht hier! Das habe ich gelernt. Also: was machen? Klar! Messen: wie pegelabhängig ist denn der PNTS? Wie reagiert er auf geringere Eingangssignale als im Manual angegeben?

Das muss ich herausfinden. Also mache ich eine Messreihe, bei dem ich die vom PNTS erzeugte BeatNote messe (vgl. Kapitel 30) und dabei die Leistung an U_{REF} und U_{DUT} variiere.

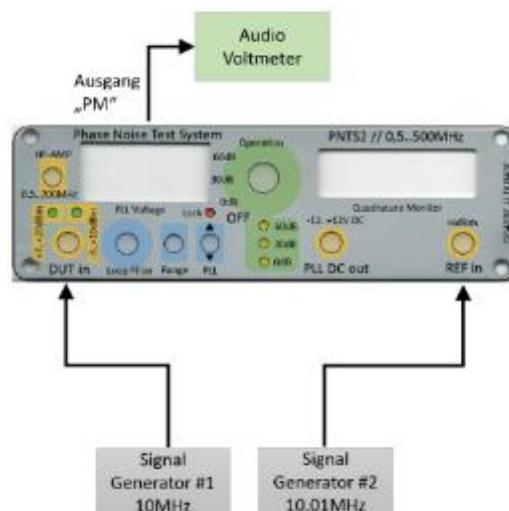


Abbildung 88: Messaufbau für Beate-Note Pegelabhängigkeit



Abbildung 89: Messaufbau "in echt"

Es kommt diese Grafik heraus:

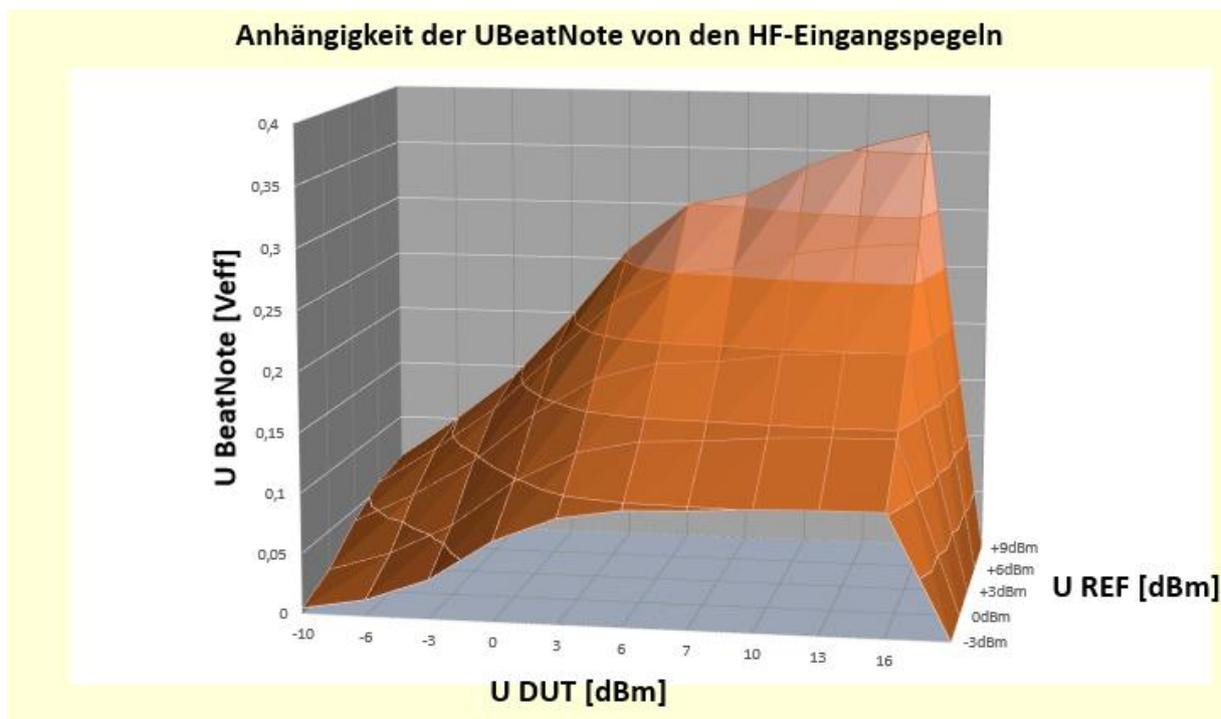


Abbildung 90: BeatNote-Spannungen als Folge variierender HF-Eingangssignale

Aha: die U_{BeatNote} (und damit die 0dBc Absolutkalibrierung) ist in der Tat pegelabhängig! Das bedeutet: je nachdem, wie groß oder klein die am PNTS anliegenden Pegel für Referenz und Messobjekt sind, kriegen wir einen anderen Nullpunkt für unsere Absolutkalibrierung. Das bedeutet: bevor ich mit dem PNTS eine Messung mache, muss ich wirklich zwingend vorher die eingespeisten HF-Pegel kennen und für genau diese Bedingungen eine U_{BeatNote} erzeugen und messen, womit ich dann den Korrekturfaktor für den Audioanalyzer berechnen kann!! Oder?

Nun sieht es in linearer Darstellung ja immer gleich dramatisch aus. Ist es denn wirklich so schlimm? Gucken wir es uns mal in logarithmischer Ansicht an:

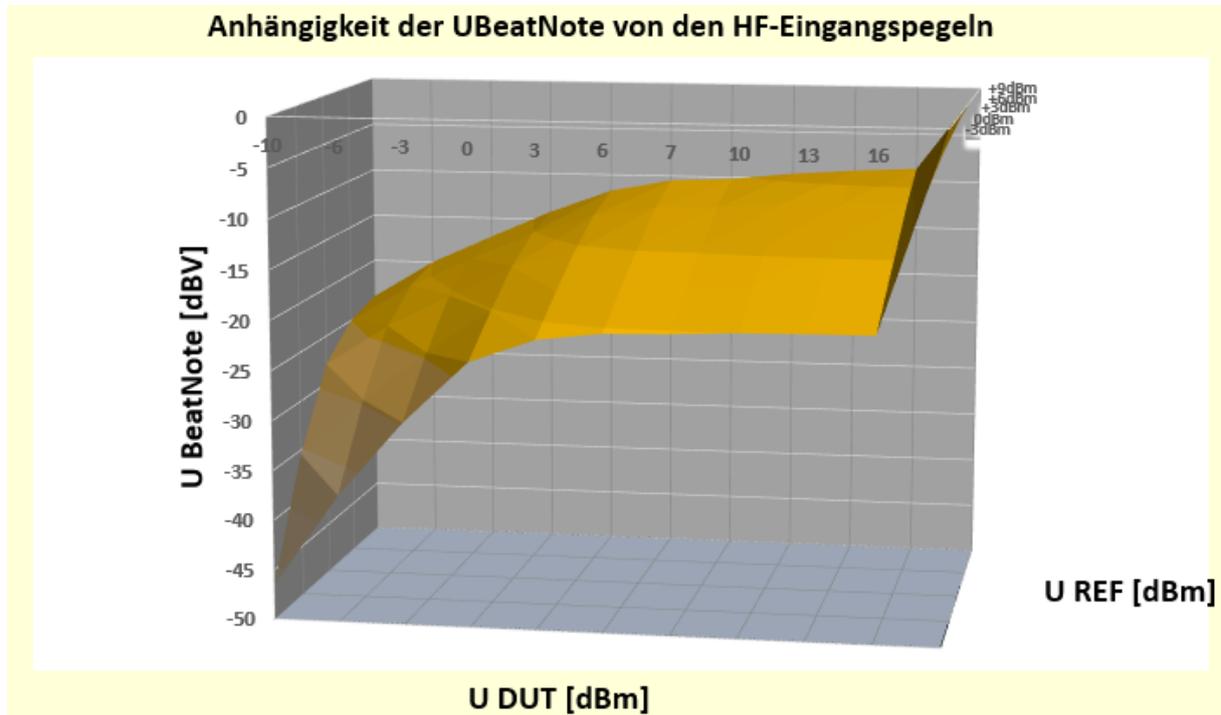


Abbildung 91: BeatNote-Spannungen als Folge variierender HF-Eingangssignale (log)

Sieht hübsch aus, man erkennt aber gar nix. Also lieber in 2D:

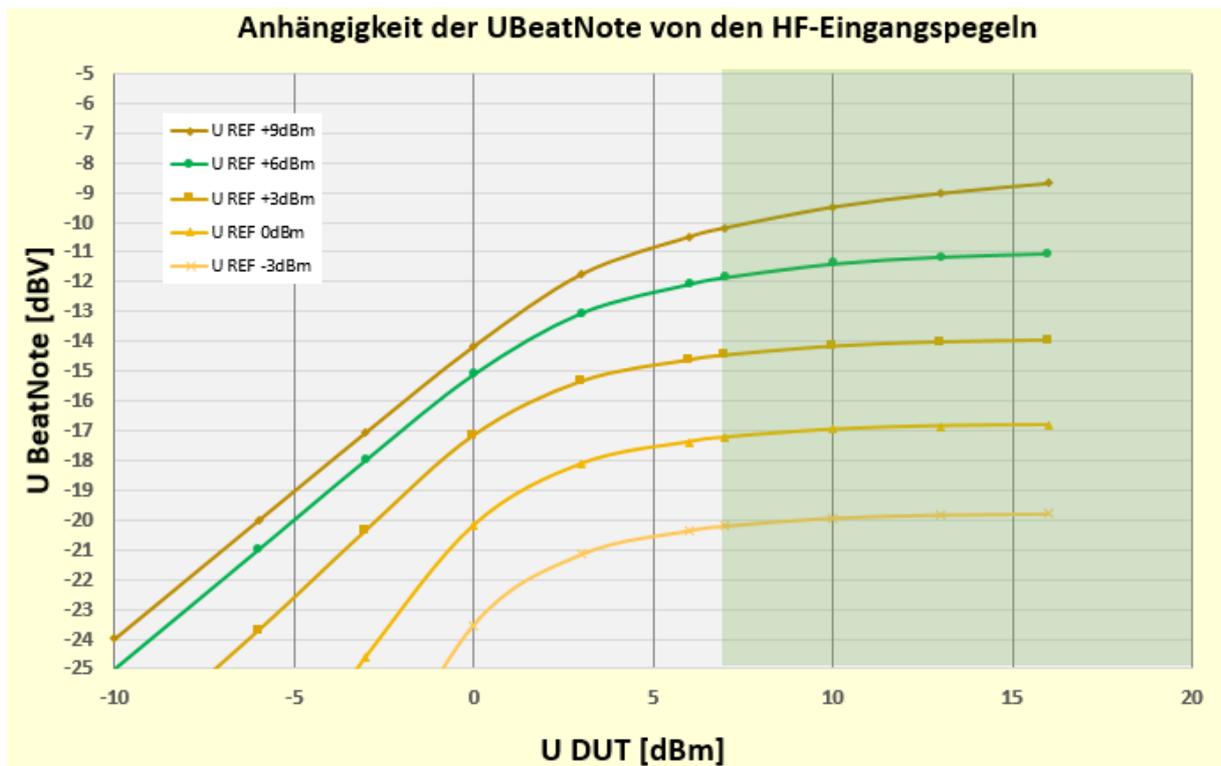


Abbildung 92: Darstellung in 2D

Was sagt uns das?

Also. Laut Manual soll der Referenzoszillator eine Leistung von $P_{REF}=+6\text{dBm}$ einspeisen, damit der PNTS optimal läuft. Diese Kurve habe ich oben in Abbildung 92 grün eingefärbt.

Schaltet man den HF-Verstärker aus, darf man in den PNTS an der P_{DUT} -Buchse Pegel von $+7..+20\text{dBm}$ einspeisen. Diesen Bereich habe ich ebenfalls einmal grün hinterlegt.

Und schon sehen wir, dass Bernd seine Hausaufgaben gemacht hat: betrachtet man die grüne Kurve und die Variation in dem grün hinterlegten Bereich, so sehen wir, dass sich die Beat-Note um maximal 1dB ändert, wenn das Messobjekt einen Pegel zwischen $+7..+16\text{dBm}$ liefert! Bedeutet: nur für ganz, ganz, ganz präzise Messungen müssen wir vorher die BeatNote nochmal nachmessen. Wenn wir sicherstellen können, dass die dem PNTS angebotenen Signale stets in dem im Manual angegebenen Bereich sind, machen wir maximal 1dB Fehler, wenn wir auf eine individuelle Nachkalibrierung der BeatNote verzichten und den Referenzwert nur ein einziges mal aufnehmen (z.B. mit $+10\text{dBm}$ oder was man sonst am meisten als DUT-Pegel erwartet) und ihn als Referenzwert in unseren Audio-Analyzer dauerhaft übernehmen!

Wir sehen aber noch etwas: der PNTS funktioniert auch mit kleineren HF-Pegel am Referenzeingang. Man verschenkt dabei vermutlich etwas Dynamik (weil man sich ja dem Noisefloor des NF-Verstärkers nähert), aber betreiben kann man den PNTS immernoch. Und zwar scheint die Dynamikeinbuße dB-linear zum Referenzsignal zu sein; d.h.: 3dB weniger Pegel bedeutet 3dB weniger Dynamik!

Also: nicht mehr glauben, sondern wissen: der PNTS kann auch mit kleineren Pegel betrieben werden- wenn auch mit Einschränkungen! Das ist gut zu wissen, ist in der Praxis aber vermutlich nicht wirklich von Belang. Wenn man den PNTS-internen HF-Verstärker aktiviert, steht einem ein spezifizierter Eingangsbereich ab -3dBm zur Verfügung; das sollte wohl nahezu JEDER Prüfling liefern können!

Ich messe mal nach, was an am REF-Eingang des PNTS so anliegt, wenn ich den Trimble 65256 als Referenz-Signalquelle verwende (Abbildung 80):



Abbildung 93: Pegelmessung am REF-Eingang

Dazu schleife ich einen Durchgangstastkopf in den Signalweg ein, denn der PNTS scheint das HF-Signal nicht zwangsläufig sauber mit 50Ω abzuschließen, so dass ich nicht davon ausgehen kann, dass ich einfach mit $P_{EMK}=-6\text{dB}$ rechnen kann.

Abbildung 93 gibt mir recht: anstelle der theoretischen +3dBm messe ich 4,60dBm am Eingang und am Eingang für das Testobjekt sogar +6dBm.

In meinem Diagramm der HF-Pegel befinden wir uns damit also an folgendem Arbeitspunkt (rotes Kreuz):

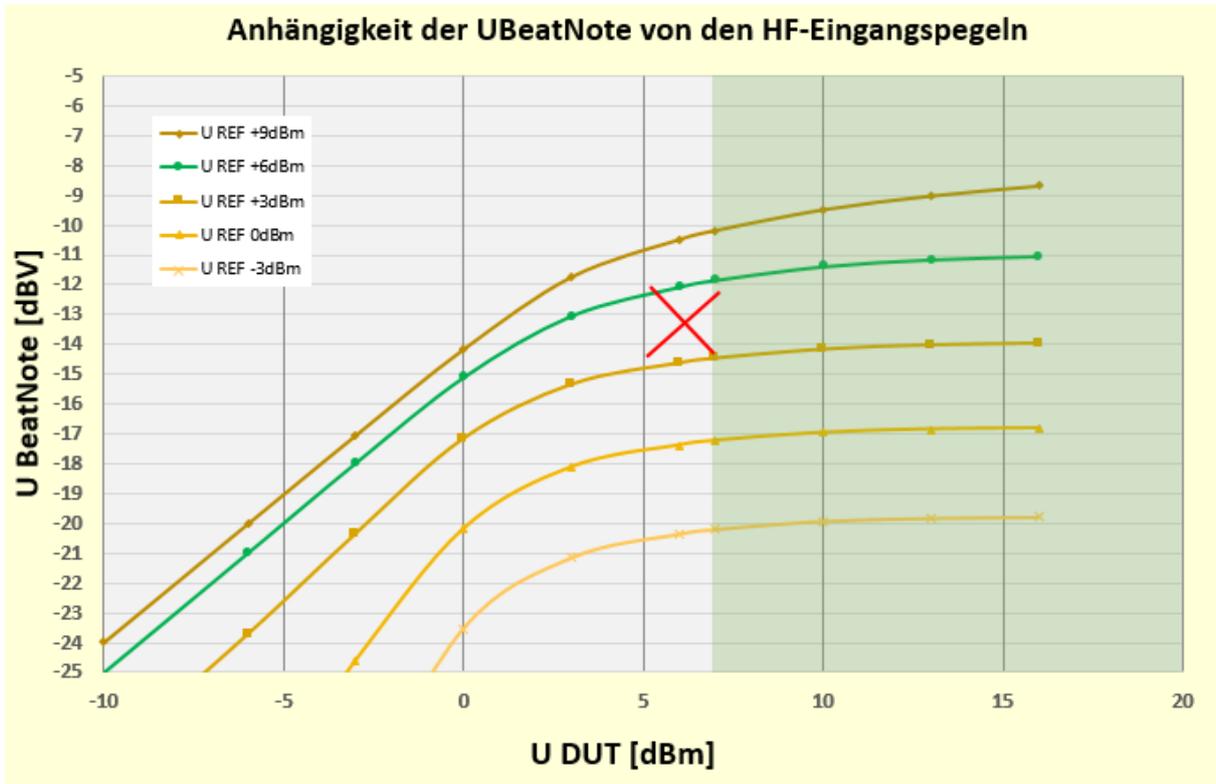


Abbildung 94: Arbeitspunkt für System Noise Floor-Messung

Nun will ich natürlich genau wissen, welche U_{BeatNote} ich für diesen Arbeitspunkt erhalte. Da sich der Trimble leider nicht um 10kHz nach oben oder unten verstimmen lässt, benutze ich zwei Signalgeneratoren und verkabele gemäß Abbildung 88.

Mit dem Durchgangstastkopf stelle ich die Signalgeneratoren so ein, dass ich am PNTS wieder dieselben Pegelverhältnisse wie vorhin erhalte ($P_{\text{DUT}} = +5,99\text{dBm}$ und $P_{\text{REF}} = +4,60\text{dBm}$).



Abbildung 95: die beiden Signalgeneratoren

Wow! Ich erhalte diese Werte bei bis auf das hundertstel dB absolut identischer Pegel-einstellung (+2,81dBm, siehe Abbildung 95)! So ein super Tracking zwischen den beiden Outputs des Mini-Circuits Splitters hätte ich nicht erwartet!!!!

Mein Audioanalyzer misst für diesen Fall:



Abbildung 96: BeatNote Messung

$$U_{\text{BeatNote}} = 0,1666 \text{ V}_{\text{eff}}$$

Damit ergibt sich V_r (für den R&S UPL): 1677,2V

Nun kann die Messung endlich losgehen!

36 Perverser Mischer

Nein, ich meine damit keinen Mischpultbediener neben der Bühne eines lokalen Stadtfestes, sondern schlicht die Tatsache, dass der PNTS seinen Eingangsmischer "andersherum" betreibt. Das zu wissen, ist im Umgang mit ihm oft vorteilhaft.

So hätte der Erfinder des Mixers im PNTS seinen Betrieb eigentlich gedacht:

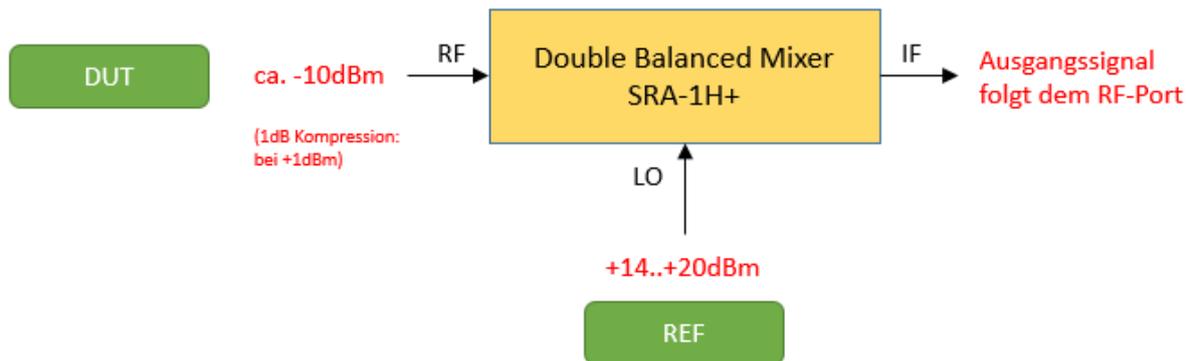


Abbildung 97: "regulärer" Mischerbetrieb

So allerdings wird er im PNTS verwendet:

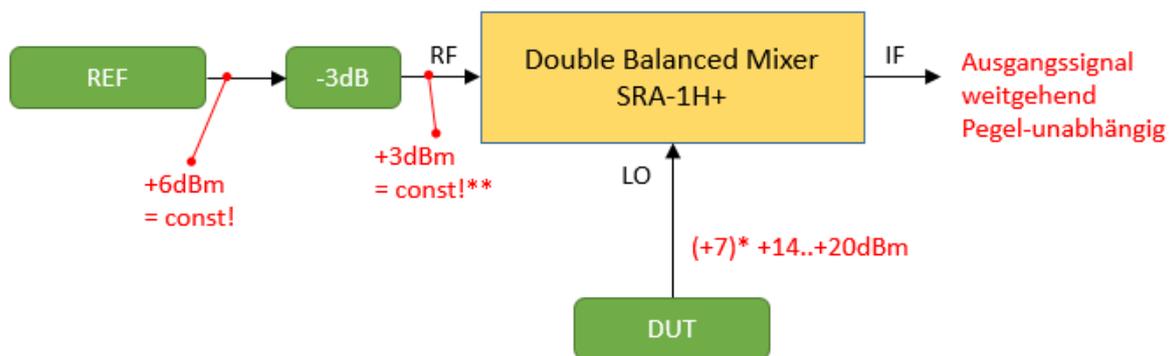


Abbildung 98: Betrieb im PNTS

* obwohl erst ab +14dBm LO-Pegel spezifiziert, reichen +7dBm bereits zum Betrieb aus

** liegt gerade so oberhalb 1dB Kompressionspunkt; d.h. Ausnutzung der max. möglichen Dynamik

Und das aus gutem Grund: Indem ich nicht die Referenzoszillator, sondern das Prüfobjekt an den "LO"-Eingang anschließe, erreiche ich eine verbesserte Pegel-Unabhängigkeit der Beatnote zum Eingangssignal des Prüflings. Nur so kann Bernd es erreichen, dass der PNTS so einen breiten Eingangsbereich verkraftet (+7..+20dBm), ohne dass eine Neukalibrierung der BeatNote notwendig wird!

37 System Noise Floor (Teil2)

Nach diesem Ausflug nehme ich die Messung des System Noise Floors noch einmal in Angriff. Ich verkabele also alles wieder gemäß Abbildung 80, tippe den richtigen Kalibrierfaktor in den UPL und erhalte das hier:

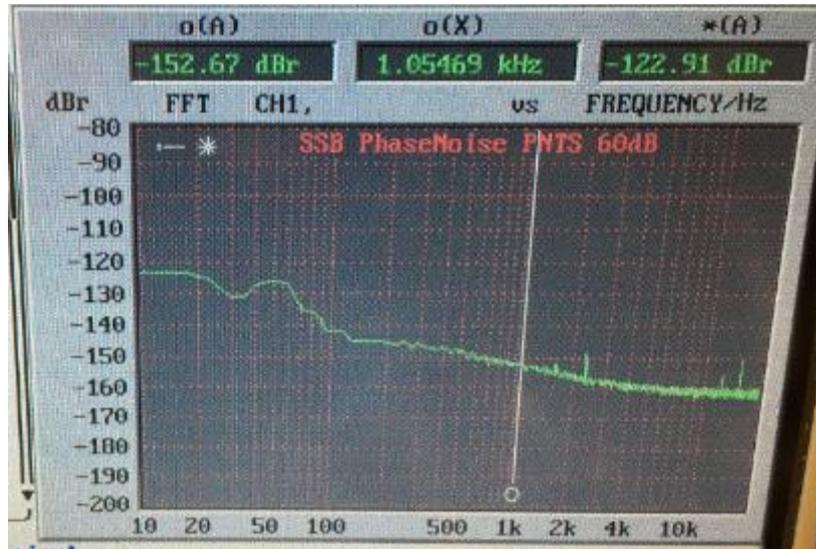


Abbildung 99: System Noise Floor meines PNTS (Trimble 65256 REF Osc)

Ist das jetzt gut? Was hatte denn der PNTS-Erfinder? Schauen wir uns Abbildung 85 noch einmal an. Da stehen ja Zahlenwerte für 10, 100, 1000 Hz usw. drin. Ich tippe die mal ins Excel und lege meine Kurve darunter.

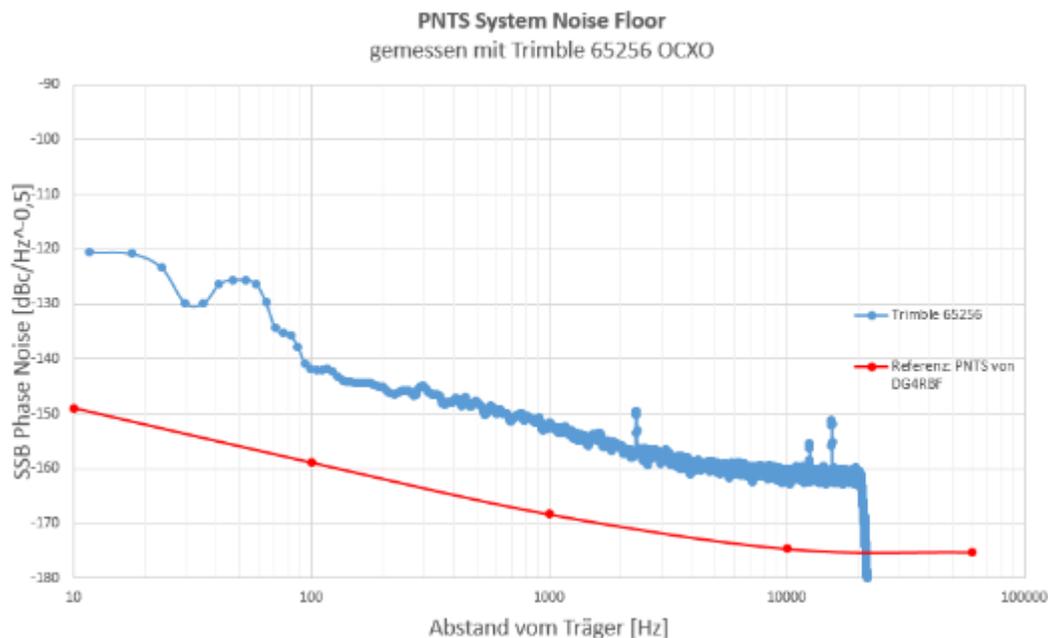


Abbildung 100: Vergleich System Noise Floor

Ohje. Zu der Kurve von Bernd fehlen ja durchgängig mindestens 10dB! Habe ich meinen PNTS-Aufbau wirklich so schlecht gemacht? Was in aller Welt rauscht denn da noch so?

Ich habe eine Idee.

38 Einfluss der Signalgeneratoren

Ich habe ja gelernt, dass bereits der HF-Pegel des Prüflings einen Einfluss auf die Kalibrierung hat- wenn auch nur einen geringen (ca. 1dB). Was ist denn aber mit dem Referenzoszillator? Eigentlich sollte der sich mit seinem Eigenrauschen durch das Messprinzip selber herausmitteln, aber - tut er das wirklich?

Falls das mit dem Sich-Selbst-Auslöschung wirklich funktioniert (so ähnlich wie die Übertragung eines symmetrierten NF-Signals), müsste es doch nahezu unabhängig davon sein, was für eine Quelle ich da anschließe, oder?

Probieren wir's doch mal aus.

Ich stöpsle den Trimble 65256 Oszillator ab und hänge stattdessen ein paar meiner Signalgeneratoren dran. (Natürlich achte ich stets auf korrekte Einhaltung der 90°; was hier aber viel leichter ist, denn ich kann bei den Generatoren einfach die Frequenz so lange um ein paar kHz verstellen, bis alles passt!).

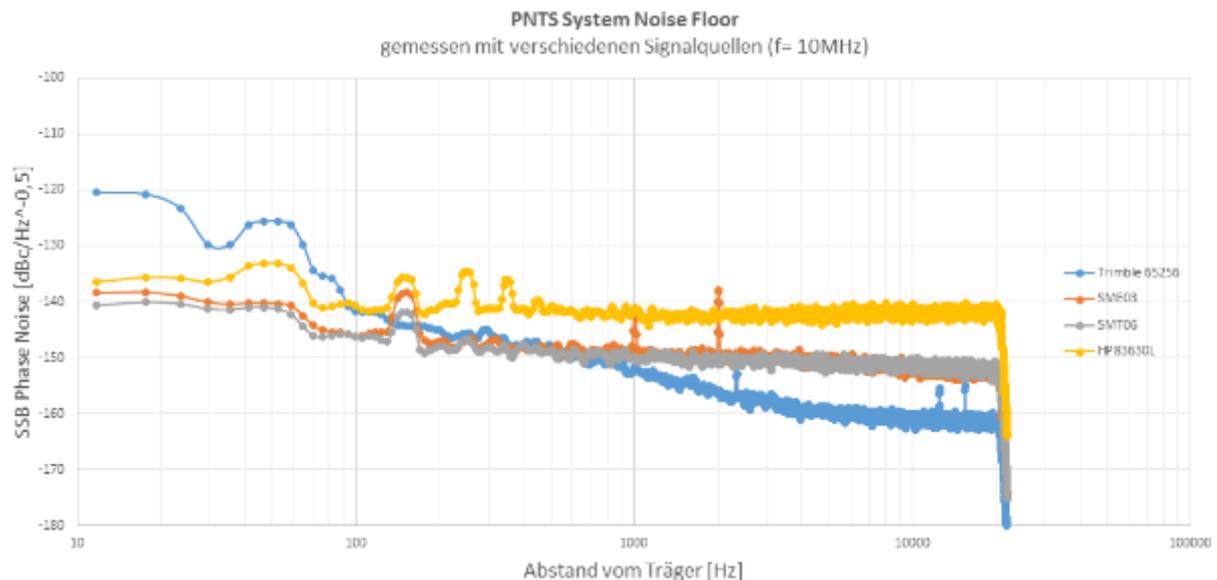


Abbildung 101: Einfluss der Signalgeneratoren auf die Messung!

Verflixt und zugenäht! Der verwendete Signalgenerator hat also DOCH einen Einfluss auf die Messung! Und die PLL-Generatoren zeigen sich gerade hinsichtlich trägernahen Rauschens (vermutlich durch die PLL) noch deutlich performanter als mein Trimble Quarzoszillator.

Bernd hat's wahrscheinlich schon im voraus gewusst und grinst nun über beide Ohren, aber für mich ist das hier Neuland. So richtig "verstehen" tue ich das auch alles nicht, wenn ich ehrlich bin.

Ein Anruf bei Bernd bestätigt es: natürlich hat er es auch bereits gewusst, aber genauso wie ich, kann er über die Gründe auch nur mutmaßen. Am vernünftigsten erscheint mir jedoch die Erklärung, dass der Signalgenerator seinem Ausgangssignal eben auch breitbandige Störsig-

nale mitliefert, die sich dann eben nicht mehr gegenseitig auslöschen! Bedenke: die 90° stimmen ja nur für eine bestimmte Frequenz ganz genau und dementsprechend wird nur ganz genau diese Frequenz sicher gegenseitig auslöschen. Für alle anderen trifft die 90° -Bedingung nicht mehr zu (=andere Frequenz => andere Laufzeit) und eine Auslöschung kann nicht mehr stattfinden und schlägt dementsprechend auf das Ausgangssignal durch.

Ob es wirklich so ist?

Keine Ahnung. Aber es ist die vernünftigste Erklärung, die uns derzeit einfällt!

39 Und nun?

Tja. Gute Frage.

Wahrscheinlich werde ich Bernd nachgeben und doch einen seiner Testoszillatoren aufbauen müssen. Wie stark abhängig das Ergebnis -selbst bei dieser Messung- von der verwendeten Referenzquelle ist, erlebe ich ja bereits, wenn ich nur einen anderen Trimble 65256 (ich habe ins Summe drei Stück davon) an den PNTS klemme. Obwohl eigentlich baugleich, scheint die Länge der Verzögerungsleitung dann bereits nicht mehr 100%ig zu passen, und diese paar Zehntel Grad reichen schon aus, dass ich stark abweichende Ergebnisse zum ersten Trimble 65256 erhalte. Besonders deutlich wird es, wenn man eine kleine NF-Monitorbox an den PNTS anschließt und sich das (nicht komplett ausgelöschte Rest-) Signal akustisch anhört.

Momentan werde ich mich also tatsächlich mit dem Erreichten zufrieden geben müssen. Dass mein PNTS grundsätzlich das Potenzial hat, auch auf -170er Werte im System Noise Floor zu kommen, begründe ich mit den guten Messwerten des LowNoise-NF-Amps und viel mehr ist da ja auch nicht mehr davor. Nur eben der Mischer.

40 HF-Posaune

Natürlich hat der Bastelkreis zum Thema "90°" noch ein As im Ärmel. Liebe Leute, ich muss ja zugeben, dass ich mich selber rühme, mich doch einigermaßen mit HF-Messtechnik und ebenso mit Musik auszukennen, aber eine "HF-Posaune" kannte ich noch nicht. Das ist wohl ein geläufiger Kurzbegriff für einen "Line Stretcher" bzw. "Phase Shifter", der durch seine Bauart und dem ausziehbaren Gestänge an eine Zugposaune erinnert. Damit kann man durch Verändern der Leitungslänge (rausziehen oder reinschieben) eine ganz exakte Phasenbeziehung erreichen und tatsächlich ist es das, was mir im zweiten Versuch noch einmal ein paar dB bringt:



Abbildung 102: Trimmung der Leitungslänge

Ich habe zwar eine Menge Musikinstrumente, aber alle nur für den NF-Bereich. Daher muss ich mit einer ganzen Batterie SMA Connector-Savern in Reihe vorlieb nehmen und trimme damit die Phase derart, dass ich tatsächlich in 10kHz Abstand zum Träger Werte von bis zu etwa $-167,5\text{dBc}/\overline{Hz}$ ablesen kann.

Das sind zwar nicht die < -170 er Werte von Eric und Bernd, aber doch so weit dran, dass ich mich damit erstmal zufrieden geben und meine Zeit wahrscheinlich besser investiert ist, Bernds Low-Noise-Oszillator nachzubauen als jetzt hier am PNTS noch groß herumzuschrauben.

Außerdem sei der PNTS auch gering frequenzabhängig, wie mir Bernd berichtet. Um eine wirkliche Vergleichbarkeit zwischen den anderen PNTSen und meinem herzustellen, brauche ich zwingend den gleichen Testoszillator (100MHz). Das hebe ich mir für später auf, denn ich will zum Ende kommen.

Also: Thema abgeschlossen. Gehen wir das (vor;-)letzte an.

41 Hochstrom

Wie...es gibt beim PNTS noch offene Themen? Schon fast 80 Seiten und noch immer nicht fertig?

Nein, leider nicht. Und das habe ich sogar meiner eigenen Eiselei zu verdanken. Hätte ich bei meinem Power-Schaltkonzept vor dem LötKolben erstmal ein paar eigene Hirnzellen bemüht, hätte ich das vielleicht gleich von Anfang an besser machen können, aber egal. Wer klug ist, lernt aus Fehlern. Wer richtig intelligent ist, macht erst gar keine.

Ich beobachte schon seit Wochen, dass ich meinen PNTS mit dem Drehschalter kaum ausgeschaltet kriegen. Will sagen: ich schalte in die Stellung "OFF", die Relais sollten den PNTS von der Betriebsspannung trennen- tun sie aber nicht! Obwohl das Gerät eigentlich ausgeschaltet ist, leuchtet mich noch fröhlich die Drehspulanzeigenbeleuchtung an und auch die PNTS-Platine arbeitet noch!

Zuerst dachte ich an Zauberei. Dann an defekte Relais. Also raus damit, neue rein. Neue Platine, neue Kabel, alles neu. 1 Tag wieder weg. Erfolg: nur die ersten 5 Minuten, dann fängt der Mist erneut an: die Relais schalten ein, aber nicht wieder aus. Was ist hier los?!?!?

Da die Relais ohne angelegte Spulenspannung trotzdem durchschalten, fällt mir nur eine einzige Erklärung ein: die Kontakte kleben! Um das nachzuweisen, habe ich sogar ein defektes kompliziert aufgesägt, aber man sieht natürlich nix.

Also, nehmen wir mal an, die Kontakte kleben wirklich. Woran könnte das liegen? Zu hoher Strom? Der PNTS braucht doch nur ein paar mA- wie kann das für die Relais zu viel sein?

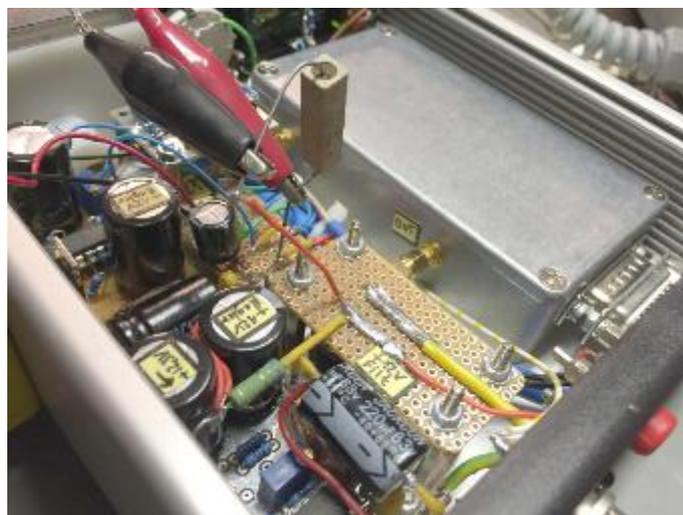


Abbildung 103: 0,47Ohm Widerstand in Reihe

Die Antwort ist einfach: die dicken Filterplatinen mit den 4700 μ F Low-ESR-Elkos!! Die ziehen im Ein- bzw. Ausschaltmoment solche Ströme, dass sie die Relaiskontakte regelrecht "verbrennen". Gut beobachten konnte ich das, als ich mal die +12V-Leitung abgelötet hatte und das Kabel manuell an die PNTS-Schaltung an einen Kontakt herangehalten habe: es gab einen richtig kleinen Blitz an der Kontaktstelle!

DAS wollte ich genauer untersuchen. Also einen 0,47Ohm Widerstand in die +12V Leitung eingelötet und ein Speicheroszilloskop darüber angeklemt (natürlich an einem Trenntrafo

isoliert betrieben). Mit "Single Trigger" das Oszilloskop in Lauerstellung und dann den PNTS ein- und ausgeschaltet. Als das Relais irgendwann dann einmal zufällig schaltete, kam folgende Kurvenform ins Oszilloskopbild:



Abbildung 104: Stromspitze im positiven +12V-Netz

Meine Fresse!

9,2V Spannungsabfall über einem 0,47Ohm-Widerstand bedeuten Spitzenströme von fast 20A! Dass das kleine Relais damit überfordert ist, wird mir nun auch klar. SO viel hätte ich nicht erwartet!



Abbildung 105: fast 20A Spitzenstrom!

Als erste Idee löte ich eine von den Drosseln in die Leitung, die im PNTS-Netzteil sowieso schon verwendet werden (150μH).



Abbildung 106: Drossel in Reihe

Damit reduziert sich der Peak auf 5,6V. Das sind aber auch immernoch fast 12A!

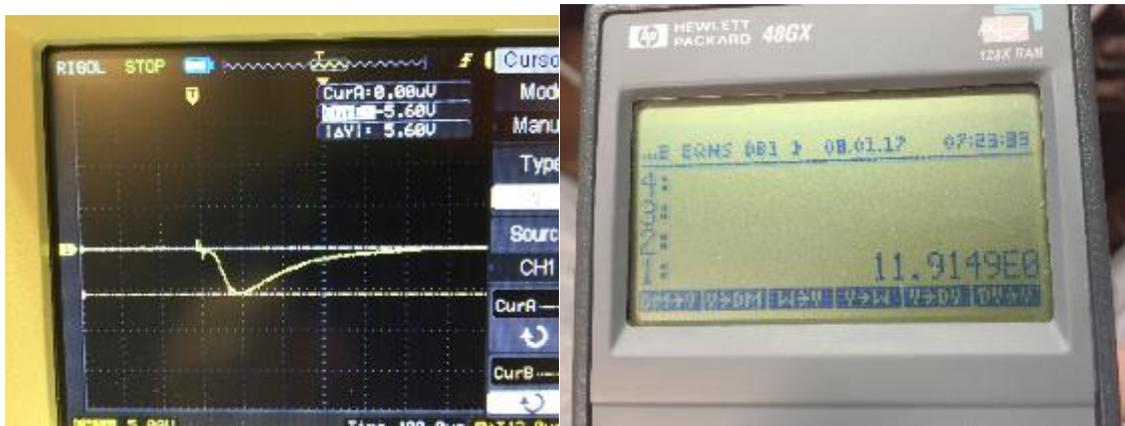


Abbildung 107: die Drossel bewirkt einen Rückgang von 20A aus 12A

Auf der negativen Spannungsseite (-12V) sieht es ähnlich aus. Die riesigen Filterbänke mit den dicken Elkos, die man braucht, um eine möglichst saubere und rauscharme Betriebsspannung für den PNTS zu haben, ziehen im Einschaltmoment natürlich dicke Einschaltströme und das schaffen die Relais einfach nicht.



Abbildung 108: auf den -12V sind es auch immerhin 15A

So schwer es mir fällt: ich muss mein komplettes Schalt- und Powerkonzept überdenken. Das Schalten der Filterbänke mit Miniaturrelais kann ich vergessen und größere Relais passen leider in das kleine PNTS-Gehäuse nicht hinein. Also:

42 Rückbau II

Ich komme mir vor wie bei einem Auto, das in einer Schneewehe feststeckt und versucht, durch ständiges Vor- und Zurückrollen wieder auf die Fahrbahn zu kommen.



Abbildung 109: raus mit dem ganzen Relais-Mist!

Ich setze also mal wieder zurück und an einem verschneiten Sonntag Morgen (wenn das keine tolle Metapher zum Einleitungssatz ist!) reiße ich also den ganzen Relaismist heraus, spendiere die in Bernds Schaltplan eingezeichnete, separate Filterbank für den HF-Amp und die beiden Re1 und Re2-Anschlüsse und verkabele den ganzen PNTS neu um. Der Drehschalter verkümmert fast zu einem reinen Betriebsartenumschalter, man wird den PNTS dann später über das Netzteil ausschalten müssen. Ein Relais muss ich aber doch einbauen: und zwar das für das DVM-Anzeigemodul, das von der 9V-Batterie versorgt wird. Hier genügt wirklich ein kleines Reed-Relais. Mit 55mA Spulenstrom belastet es das PNTS-Netzteil auch nicht so stark, dass ich mir hier Brummen oder sowas einfangen würde.

Der PNTS läuft nun so eine Weile. Mit meiner Wärmebildkamera prüfe ich, wo was heiß wird und ich sehe, dass sich nur der Längstransistor des positiven +12V-Zweigs auf ca. 40°C erwärmt. Das ist in Ordnung, einen Kühlkörper brauche ich daher (noch) nicht.



Abbildung 110: PNP-Längstransistor im PNTS Netzteil

Erstaunlicherweise sinkt der System Noise floor des LowNoise-Amps (Mischer herausgezogen und NF-Eingang gebrückt) um ein weiteres μV , so dass ich mit meinem B&K 2636 nun ein Rauschen von etwa $85\mu\text{V}$ messe, das manchmal auch in Richtung $84\mu\text{V}$ geht. Will sagen: schlechter ist der PNTS durch diesen Umbau nicht geworden- eher besser.

Verzückt lasse ich das Gerät so nun eine Weile vor sich hin laufen und prüfe nochmal hier und da etwas- ohne große Systematik. Die PLL schaue ich mir mal an und erkenne durch Drehen am Loop-Filter-Poti, dass sich ihr Verhalten tatsächlich ändert, wenn ich am Knopf drehe bzw. den Bandbreitenschalter betätige. Um hier exakte Parameter auszumessen oder Steilheiten usw. zu bestimmen, fehlt mir leider das Grundladen-Knowhow, sorry. Es soll hier erstmal genügen, dass sich die Regelung sichtbar beeinflussen lässt und genau das war gewollt.

So gerüstet, bestelle ich die noch fehlenden Restbauteile (Batteriehalter, Netzteilstecker, Ringkerntrafo, usw. für das geplante externe Netzteil) und beschäftige mich als Abschluss mit einer letzten Messung!

43 DUT-Pegelbereich

Um den PNTS etwas näher kennenzulernen, interessierte mich tatsächlich noch einmal, ob die in Kapitel 35 gemachte Behauptung der "Verwendbarkeit des PNTS auch weit außerhalb seines erlaubten DUT-Pegelbereichs" auch in der Praxis nachgewiesen werden kann.

Dazu schlieÙe ich ihn wie folgt an:

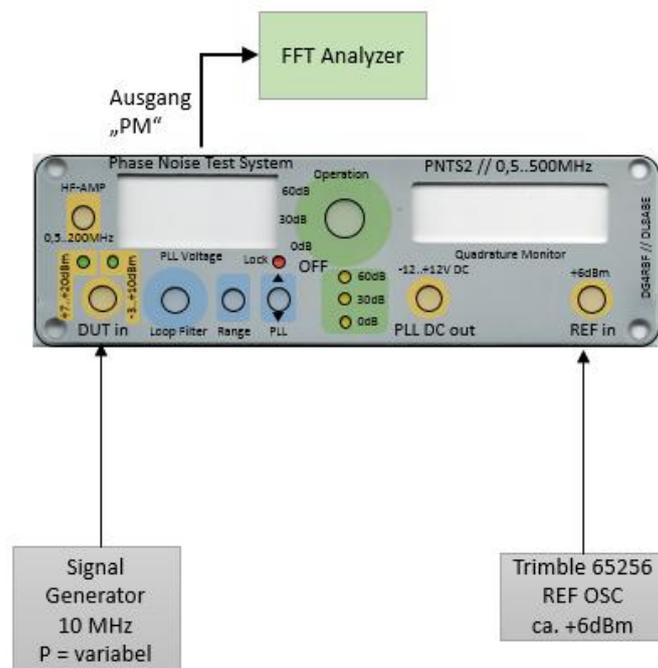


Abbildung 111: Messaufbau

Wir nehmen unseren PNTS in Betrieb und versorgen ihn spezifikationsgemäß mit einem +6dBm Referenzsignal aus meinem 10MHz Trimble-Oszillator.

Als "Prüfling" schließen wir einen Signalgenerator an, den wir im HF-Pegel variieren und dann einmal anschauen, welche Phasenrauschergebnisse der PNTS dann ausspuckt. Ich wähle hier wieder meinen R&S CMS52. Aufgrund des Arbeitsprinzips des Signalgenerators zur HF-Pegelregelung (mechanische Eichleitung + ALC) können wir davon ausgehen, dass die Phasenrausch-Performance sich nicht wesentlich ändert, sondern über seinen gesamten Pegelrange (+16dBm...-141dBm beim R&S SME; 0dBm...-139dBm beim R&S CMS52) nicht ändert.

Spricht: egal bei welchem HF-Ausgangspegel- wir sollten immer das gleiche Ergebnis bekommen!*

* Voraussetzung: die UBeatNote wird vorher jedesmal neu ausgemessen und damit die Phasenrausch-Skala für den Audioanalyzer korrekt neu berechnet, siehe Kapitel 30.

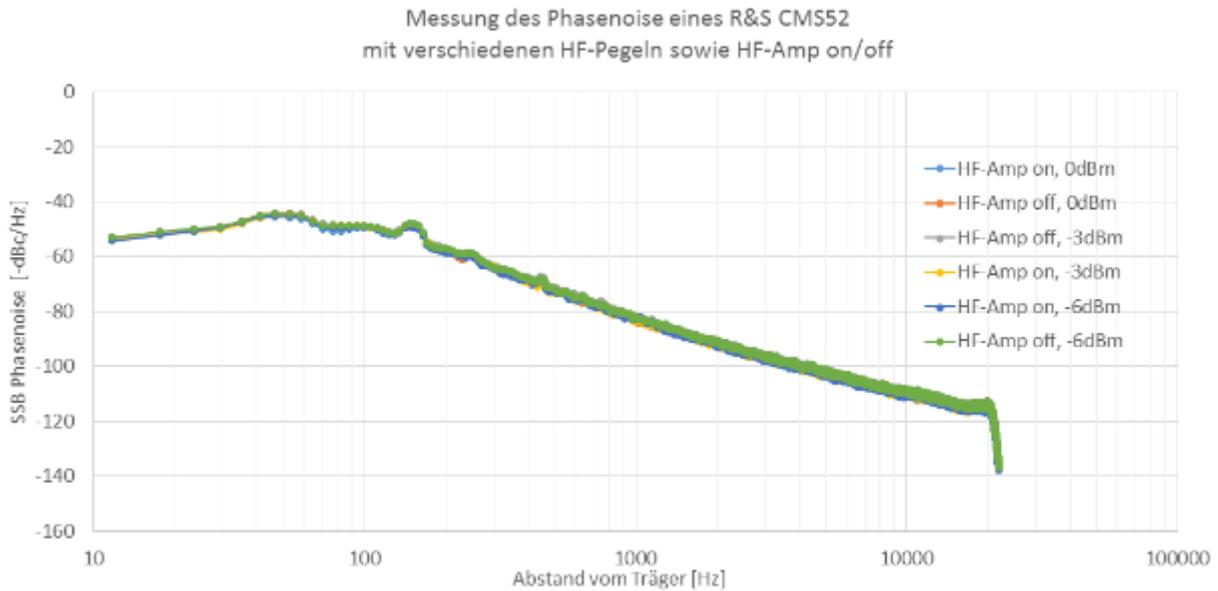


Abbildung 112: Phasenrauschen R&S CMS52 bei verschiedenen HF-Ausgangspegeln

Und genau so ist es! Wie Abbildung 112 zeigt, liegen die Ergebnisse so gut wie "aufeinander". Und das sogar, obwohl einige der Messkurven (z.B. "HF off, -6dBm") deutlich unterhalb des spezifizierten HF-Bereichs (+7..+10dBm mit HF Amp off; -3..+10dBm mit HF Amp on) liegen!

Hier noch einmal eine hineingezoomte Ansicht:

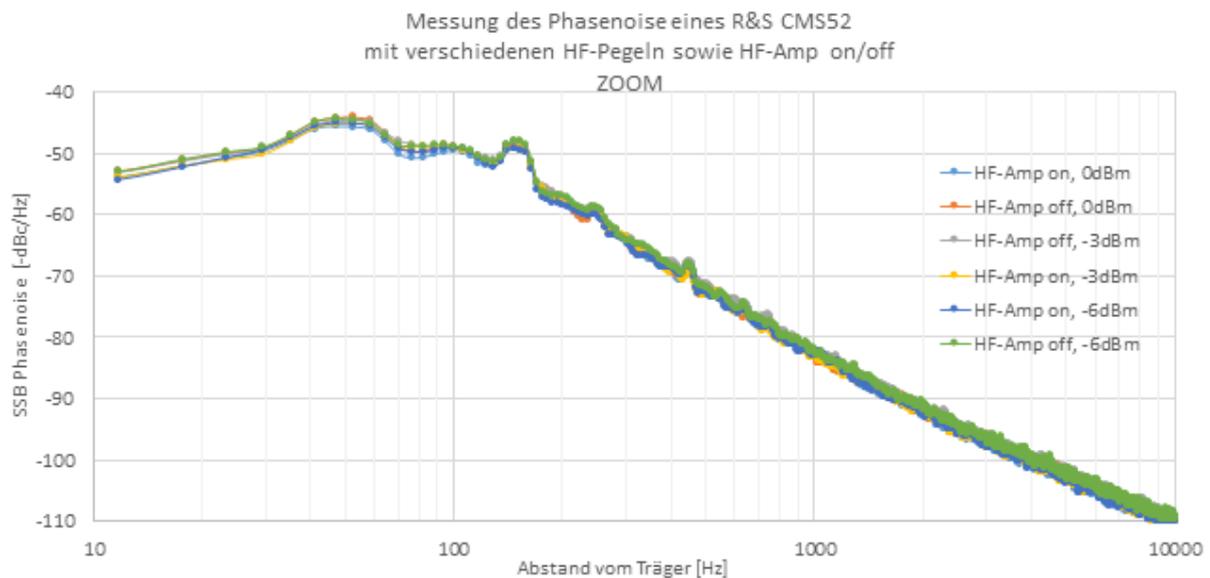


Abbildung 113: wie davor, allerdings hineingezoomt

Leider kann der CMS52 nur HF-Pegel bis 0dBm erzeugen. Also benutzen wir nun einmal den R&S SME03 als Signalquelle. Im "Overrange"-Modus schafft der bis zu +16dBm an seinem Ausgang und vielleicht ändert sich ja dann etwas?

Also los, probieren wir es:

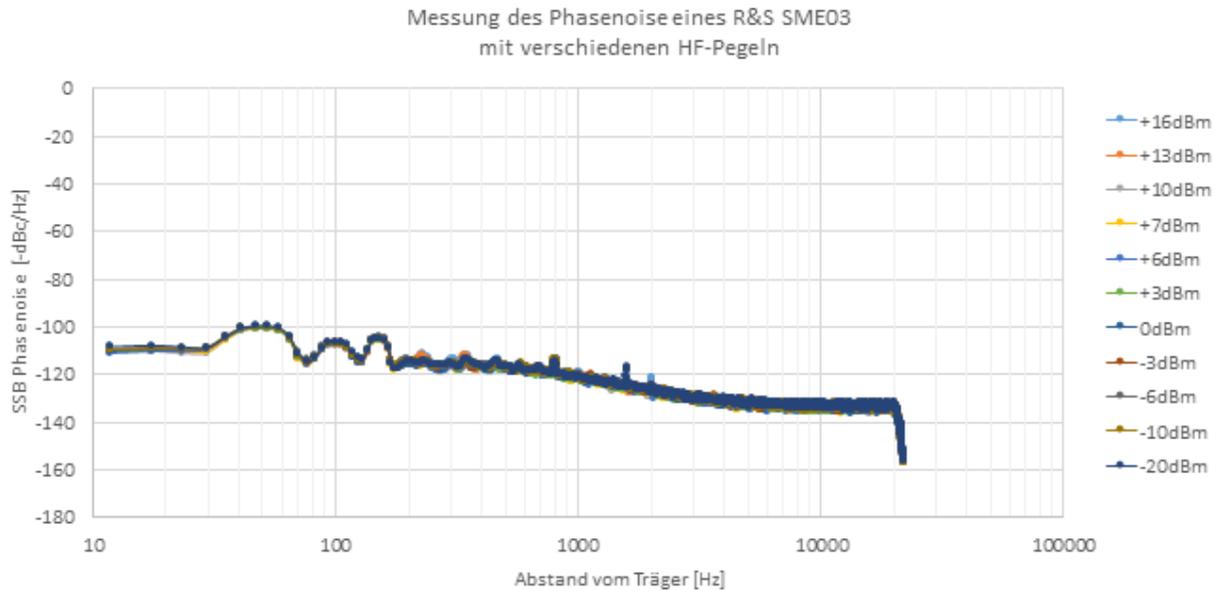


Abbildung 114: Abhängigkeit des Phasenoise vom HF-Pegel (R&S SME03)

Wow, alle Messkurven nahezu deckungsgleich! Zoomen wir einmal hinein:

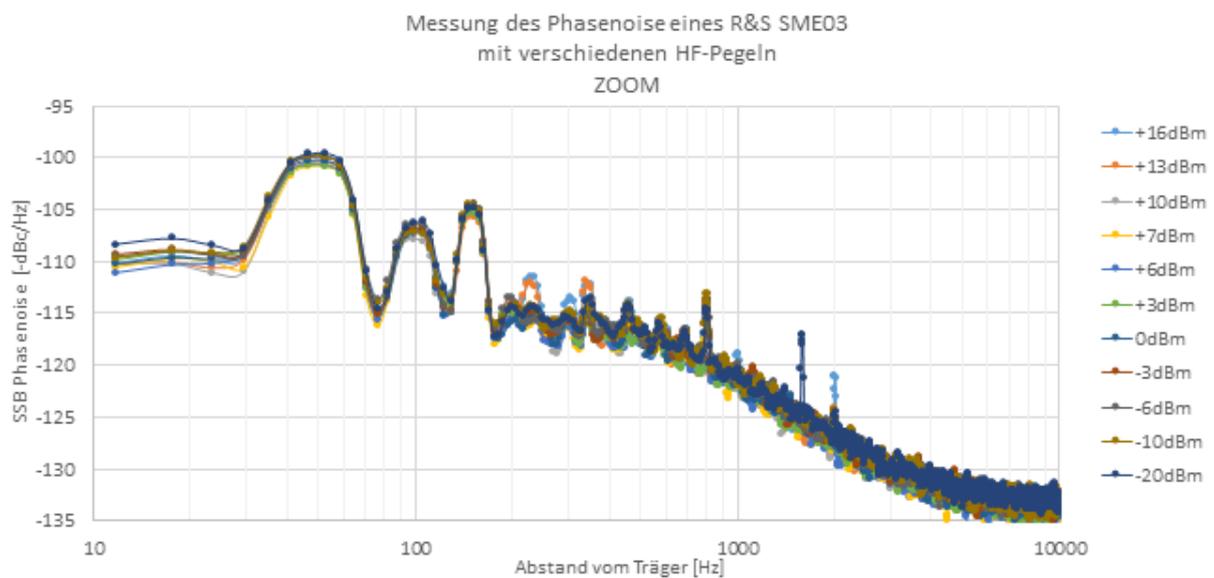


Abbildung 115: wie zuvor, ZOOM

Viola!

Selbst der unfaire Vergleich mit HF-Pegeln zwischen -20dBm (=27dB unter Spezifikation!) und +16dBm zeigt im Endergebnis kaum sichtbare Unterschiede!

Entfernen wir die Datenreihen, die sich außerhalb des zulässigen PNTS Wertebereichs liegen (also außerhalb +7..+20dBm bei HF Amp off), wird es sogar noch deutlicher:

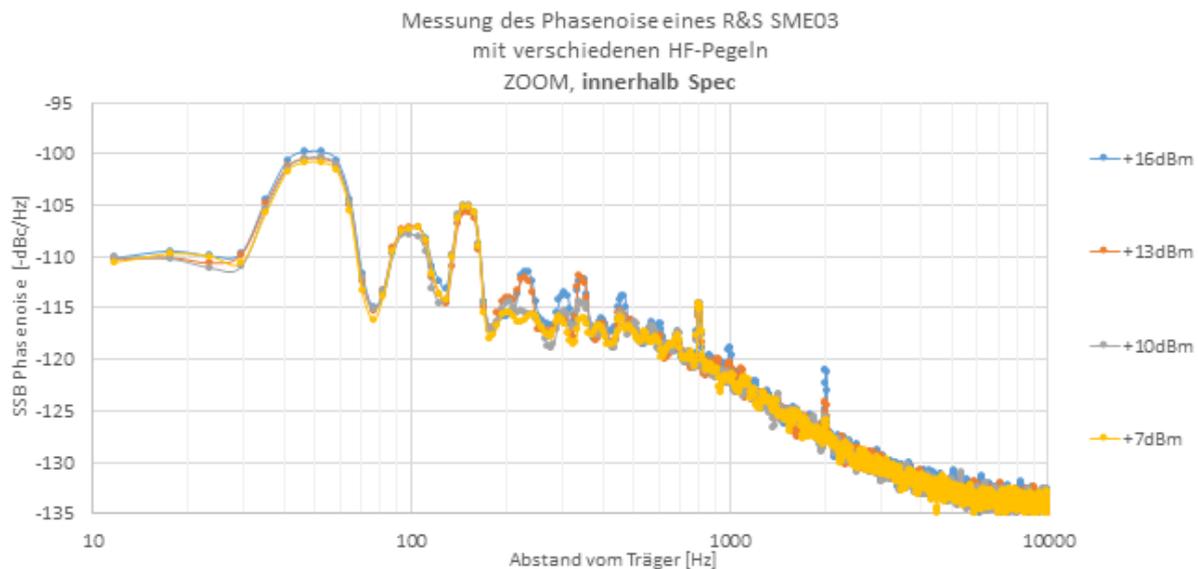


Abbildung 116: wie zuvor, allerdings nur HF-Pegel innerhalb Spec des PNTS

Das einzige, das man sieht, sind geringfügige Lokalabweichungen, z.B. bei 200..500Hz, wo wir bei manchen Kurven einen kleine Peak sehen und bei anderen nicht. Was dafür genau die Ursache ist, habe ich nicht geklärt, ist hier auch nicht wichtig. Wichtig ist: der PNTS arbeitet offensichtlich auch dann sehr gutmütig, wenn man den spezifizierten Signalpegelbereich bewusst (oder unbewusst) verlässt.

Hinweis:

Natürlich habe ich, bevor ich die obigen Messkurven aufgenommen habe, vorher eine **-zum jeweilig verwendeten HF-Pegel passende-** individuelle BeatNote ausgemessen und so die Phasenoise-Skala am Audioanalyser vorher korrekt kalibriert! (Vgl. Kapitel 30)

44 Power Supply

So langsam fühle ich mich mit meinem PNTS einigermaßen "rund" und so ziemlich alle meine offenen Fragen wurden geklärt, so dass ich bereits an einen Abschluss des Projekts denke. Da fällt mir siedendheiß ein, dass ich für das gute Stück ja noch immer kein eigenes Netzteil habe, sondern es noch immer aus meinem Rohde&Schwarz NGT Labornetzteil betreibe!

Also: Netzteil bauen!

Da das hier vermutlich nicht so schrecklich interessant für Euch ist, mache ich es kurz. Ich bestelle mir ein Alu-Druckgussgehäuse, einen 26VA Ringkerntrafo mit 2x15V Ausgangsspannung und ein paar Netzteil-Bausätze (Vellemann K1823) mit einem LM317 als Regler. Den gibt's für unter zehn Euro bei Reichelt und abschließende Messungen zeigen, dass das Modul im Leerlauf weniger rauscht als mein R&S Labornetzteil!

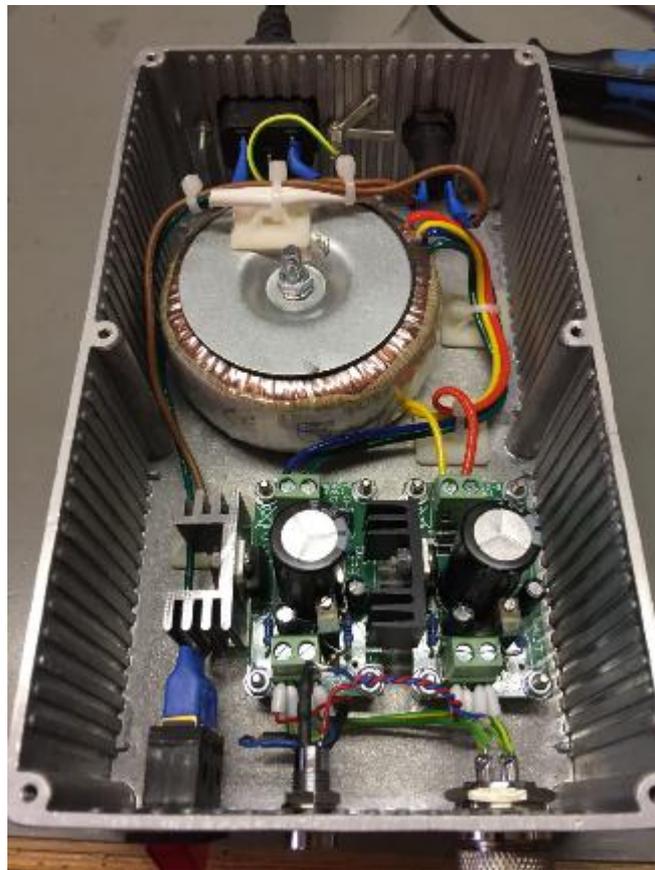


Abbildung 117: Eigenbau-Netzteil für PNTS

Sowieso bin ich begeistert, welche tolle Qualität die Elektroniker-Bausätze inzwischen haben. Als Kind erinnere ich mich noch an Plastikbeutel mit schlechten Fotokopien, auf den man den Schaltplan kaum lesen konnte. Heute kriegt man fast ein iPhone-ähnliches Auspackerlebnis, eine super Dokumentation, Qualitätsleiterplatte und Marken-Elkos. Toll! Ich bin ein wenig neidisch auf die heutige Jugend, denn früher hätte ich werweißwas gegeben für so tolle Bausätze!

Eine kleine Modifikation mache ich noch: ich wechsele den Standardtrimmer gegen einen 10Gang-Typ und füge einen Vorwiderstand ein, um Regelbereich (und Rauschen!) weiter zu

verringern. Weiterhin verbaue ich auch einen Metallfilmwiderstand statt des beigelegten Kohleschicht-Exemplars. Ansonsten mache ich aber keine Änderungen.



Abbildung 118: Netzteilplatine (Bausatz "K1823", Quelle: www.reichelt.de)

Ich baue also alles zusammen und gleiche auf 15V ab. Als Anschluss nehme ich wieder diese 4pol Mikrofonbuchse, wie sie auch am PNTS eingebaut ist.

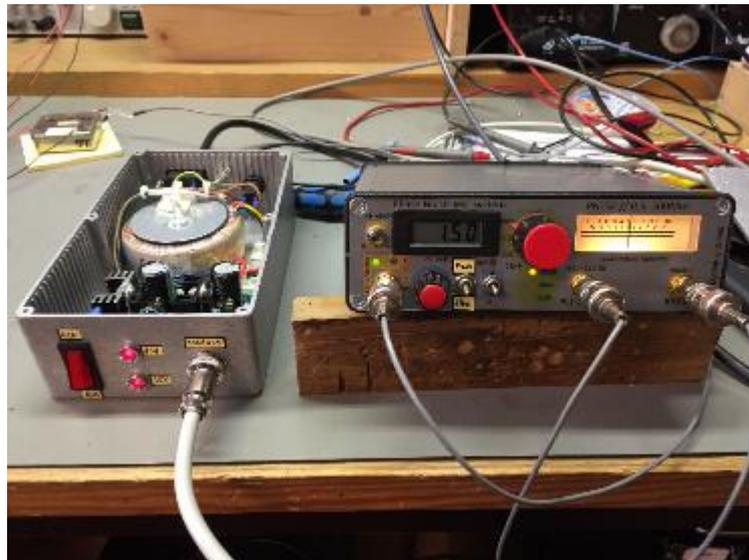


Abbildung 119: PNTS mit externem Netzteil

Dann lasse ich das Gerät eine Weile laufen und messe mit der Wärmebildkamera. Der Kühlkörper am +15V-Teil wird etwa +40°C warm. Das geht noch, MMICs werden normalerweise weitaus heißer. Ein letzter Check (Stichwort "elektrische Sicherheit") und ich schraube beiseit den Deckel drauf. Fertig!

45 System Noise Floor III

Natürlich fehlt mir noch die allerletzte Messung: und zwar die des System Noise Floors. Der Messaufbau ist wie bei Abbildung 80 und es kommt folgendes heraus:

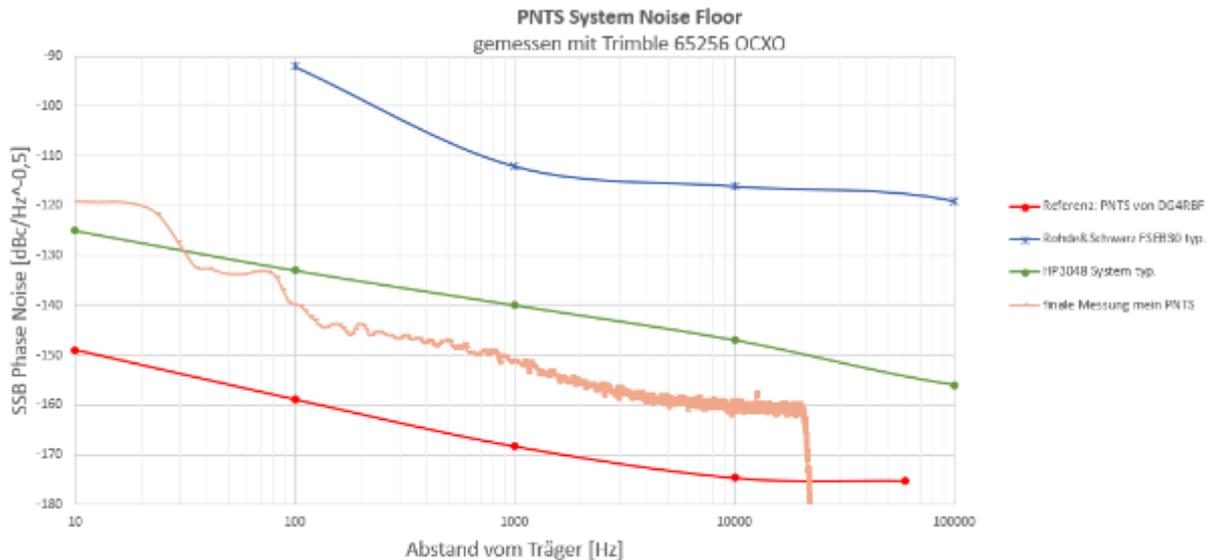


Abbildung 120: System Noise Floor (final)

Es zeigt sich, dass ich mit meinem aktuellen Messaufbau (orangefarbene Kurve) die hervorragende Systemperformance von Bernds PNTS (rote Kurve) derzeit nicht erreichen kann. Im Schnitt dürften da noch etwa knapp 20dB liegen, die mir der DG4RBF-Aufbau (und auch der von Eric) noch voraus ist.

Die Gründe dafür herauszukriegen, wäre noch einmal ein schönes Projekt, muss aber jetzt erstmal warten (die Gründe dafür siehe im Abspann). Ich persönlich vermute, dass der von mir verwendete Referenzoszillator (Trimble 65256) hier einfach nicht geeignet ist, den PNTS bis an seine wahre Performance-Grenze hin zu fordern. Zwei Leiterplatten für einen ultrascharmen 100MHz VCXO (ebenfalls von Bernd DG4RBF designed) liegen bereits hier und die Bauteile dazu sind auch schon bestellt, aber ich muss jetzt wirklich einbremsen- so spannend das auch alles ist.

Mehr als tröstlich ist jedoch, dass ich mit dem Aufbau des PNTS meine aktuelle Phasenrausch-Messgrenze (mit dem R&S FSEB30) bereits jetzt nachweislich um mehr als 40dB(!) nach unten schieben konnte und damit sogar locker die Spezifikation des HP3048-Systems übertreffe! Das ist doch trotzdem ein super Erfolg, den es wirklich zu feiern lohnt!

Ich mache also hier erstmal "Halt" und freue mich über das Erreichte!

46 Fazit

Ja, ich weiß. Meine gesamte Inbetriebnahme ist wieder nicht richtig "professionell" und ich höre schon jetzt wieder die Kritiker in den Internet-Foren. Aber bitte nochmal: wir sind hier im HOBBYbereich und solange es aktuelle gesetzliche Regelungen zur Compliance gibt, die es den Münchnern in der Mühldorfstraße leider nicht gestattet, mir einen komplett ausgestatteten Rohde&Schwarz FSUP26 zur Verifikation zu schenken, wird es wohl bei meinen einfachen, teilweise auch etwas löchrigen Ansätzen bleiben müssen.

Immerhin: mit einer ausgemessenen Abweichung gegenüber meinen Normalen von $< 2\text{dB}$ und einer Verbesserung meiner Messgrenze um mehr als 40dB sehe ich meine Hausaufgaben dennoch als "gemacht" und würde mich damit sogar trauen, in Zukunft den PNTS als Messmittel einzusetzen. Vorher sammle ich sicherlich erst noch etwas Erfahrung mit diesem neuen Messgerät, bevor ich damit auch Messberichte für die Zeitung mache. Vielleicht schicke ich auch nochmal den einen oder anderen Test-Oszillator im Bastelkreis zur Kontrolle herum, um ihn mit anderen PNTS-Benutzern (man nennt diese Technik dann "Transfornormal", wenn ich nicht irre) zu vergleichen. Denn verbessern und mehr Erkenntnisse gewinnen kann man natürlich immer und überall!

Was definitiv verbessert wurde, war mein Verständnis um Phasenoise im Allgemeinen, meinen Audioanalyzer, und das Knowhow um den Energiegehalt eines verrauschten Signals sowie mein Messgerätepark.

Was verschlechtert wurde, war mein geliebtes SMD-Kondensatorsortiment, der Ertrag meiner Solaranlage wegen Eigennutz des produzierten Stroms für meine Messgeräte, der Bestand an bleihaltigem Lötzinn und teilweise die Geduld meiner Frau. Die wartet nämlich ungeduldig darauf, dass das nächste Projekt angeht: den Umbau unserer Kelleretage zugunsten einer mechanischen Werkstatt, eines eigenen Messgeräterausms und eines Bastelraums! Ich sage nur:

Adé, Kellertreppe!

Wundert Euch also nicht, wenn mein nächster Bericht vielleicht etwas auf sich warten lässt. Ich muss mich nun erstmal darum kümmern, wie man einen $1,70\text{m}$ Yamaha Flügel auf den Spitzboden transportiert kriegt, ob der Boden auch das Gewicht von Flügel und 3 Hammond-orgeln inkl. Leslies aushält, wie ich Starkstrom samt Unterverteilung in die neue Werkstatt kriege (die derzeit noch der "alte" Musikraum ist) und ob die Power meiner Absauganlage ausreicht, Sägespäne über ca. 7m Leitungsrohr über die Decke anzusaugen. Ich muss mir stabile Labortische schweißen, mich entscheiden, wie ich meine Bastelkiste abbaue und eine neue Wand finden, die groß genug ist, um sie wieder platzsparend anschrauben zu können. Ich muss Fallrohre verkleiden, Druckluftleitungen verlegen und geeignete Werkstattfliesen aussuchen. Mich informieren, wie man eine Rasterdecke mit Akustikplatten verlegt, welche LED-Paneele ich wo anordnen muss und wie ich eine Werkstatt mit Stahlschrankmagazinen ausrüsten kann, ohne gleich das Konto einer normalen Doppelingenieursfamilie ;-) zu sprengen. Alles in allem also eine Menge Arbeit, die mich sicher das nächste halbe Jahr mehr oder weniger stark einspannen wird.

Auf jeden Fall freue ich mich aber darauf. Seid also gespannt, es wird alles noch viel geiler werden! :-)

47 Grüße

Es wird wieder einmal Zeit, Grüße loszuwerden. Wenn ich mein Email-Messgerätepostfach so durchschaue, sehe ich da seit dem letzten Grußkapitel viele, viele neue und spannende Kontakte. Also legen wir los:

Heinrich	Der es geschafft hat, seinen Netzwerkanalyser mit einer 1kW-Endstufe hochzublasen (meine volle Anteilnahme!)
Nikias	Der das offensichtlich auch geschafft hat- nur auf der entgegengesetzten Seite (Netzteil) ;-)
Michael	Ein Arzt, der sich auf den Ruhestand freut und dessen "Patient" gerade ein ESVP ist
Martin	Noch ein Arzt, aber mit besonderer Liebe zur R&S Powermetern und Messköpfen
Simon	Der mit stoischer Geduld noch immer einen SMP beatmet (vielleicht könnte ihm dabei einer unserer Ärzte helfen? ;-)
Eric	Der sich mit allem -egal was- irgendwie noch immer einen Tick besser auszukennen scheint als ich selbst ;-)
Thomas	Der sich für 2017 einen Kalender mit Röhrenprüfgeräten macht, obwohl er als frischgebackener Opa doch eigentlich andere Motive zum fotografieren hätte ;-)
Jürgen	Der sich vor 30 Jahren eine Hammondorgel und eine Frau "besorgt" hat- und heute noch beides "besitzt"- im Originalzustand! Respekt! ;-)
Dietmar	Repariert vermutlich noch immer an seinem russischen Frequenzzähler herum...
Jörn	Ein Großmeister der Reparatur- und Laborberichte!
Thomas	Findet so mir-nichts-dir-nichts von der Norm abweichende Verstärkungsfaktoren in FFT-Fenstern von R&S Audioanalyzern ;-)
Bernd	Kümmert sich aktuell gerade um Kokosnüsse und Wellen :-)
Gerald	Der mir immer kaputte Funkgeräte zum Messen bringt und sie gleich danach dann eh gleich wieder verkauft- weil er dann auch einsieht, dass sie kaputt sind ;-) Danke übrigens für die netten Weihnachtswünsche!
Dennis	Der sich jüngst zwischen "Frau" und "Messgeräten" entscheiden musste. Gute Wahl, Dennis! ;-)
Stefan	Danke für die super Beratung hinsichtlich akustischen Feedbacks bei meinen PA-Lautsprecherboxen (HK Audio "Actor DX")
Rolf	Auf den echt Verlass ist, wenn ich mal wieder einen Freiwilligen brauche, der mir irgendwelche Baugruppen aus seinen Geräten reißt und mir zuschickt ,-))
Jörg	Der sich nicht für einen geeigneten KW-TRX entscheiden kann.
Gennadi	Der einfach nicht locker lässt, sich eine eigene NRVS-Kalibrierstation aufzubauen...und das sogar bald schafft, da bin ich sicher ! ;-)
Christian	Der versucht, einen Kassenbondrucker an einen CMS52 zu fummeln. (Cool!)
Marco	Auf der Suche nach einem Trackinggenerator...
Jürgen	Der sich gerade mit 60Hz Frequenzumrichtern für Hammondorgeln beschäftigt....
Marian	Ein absolutes Vorbild für Schaltungs- und Messgeräteentwicklung! Motto: "Ich habe keinen Tracking-Generator? Dann baue ich mir einfach einen!" :-)
Duong	Ein Analysator-Freak aus Vietnam :-)
Klaus	Meinen Glückwunsch zum Umbau Deines Mikrokops auf LED!

Michael Wie er mir schrieb, soll ich ihn in meine Kontaktliste als "bärtig und ungefährlich" aufnehmen. Hiermit offiziell getan! ;-)

Willi Der mir ganz souverän vor Augen geführt hat, dass man SW-defined Radios nicht einfach mit einem normalen IP3-Messaufbau testen darf...ups.... ;-)

Yann Vielen Dank für den Scan der Unterlagen!

Jürgen Danke für die tollen Infos als "Start" für die Tests für die Zeitung!

Jo Vermutlich "stadtbekannter" HF-Entwickler, der bestimmt auch schon mal die Mühlendorfstraße mehrmals von innen gesehen hat...

Andreas Viel Erfolg beim Umzug! (Wie oft pro Jahr ziehst Du eigentlich um? Ist der Starnberger See denn so schlecht als Wohngegend? ;-) Treffen wir uns beim 16km Andechs-Trail dieses Jahr?

Till Wie geht es denn Deinem Milliohm-Meter? Reparatur geschafft?

Francesco Fingers crossed for your UPA debugging!

Ulrich Noch so ein "stadtbekannter", über den ich wohl nicht viel sagen muss ;-)

Gustav Der Urvater und Vorbesitzer meiner Sennheiser MD441 Erfolgsgeschichten!

Heinz Erfolgreich gewesen mit dem Wechsel der HF-Dioden im Tastkopf?

Matthias "Stadtbekannter Nr.3", der solche Skripte schreiben kann, dass er sogar den IP3 als Funktion des Trägerabstands automatisch messen kann. Respekt!

Werner "Stadtbekannter Nr.4". Jeder Funkamateurliebling weiß schon, ohne dass ich hier weitere Nachnamen nennen muss.

Horst Jaja, die berühmten Striche in den SME/SME/SMP/SMIQ-Displays.....

Tony Thanks for providing the tool- although I already had it ;-)

Jonny Der darf natürlich nicht fehlen: mit seinem Standort Taiwan einer meiner weiteren internationalen Kontakte...

Patrick Haste Deinen Messkopf inzwischen gefunden?

AJ ...aus einem meiner Lieblingsländer...der NIEDERLANDEN! :-)

Florian Der mir einen super Preis für einen HP Powersplitter gemacht hat, ich aber zu dämlich war, gleich zuzuschlagen...sorry nochmal...!

Matthias Läuft der FSEB20 noch? ;-)

Benedikt Tut mir leid, dass ich mich mit Quarzen nicht so gut auskenne und deshalb nicht wirklich eine Hilfe war..... trotzdem Danke für den Besuch auf der IN-TERRADIO!

Michael Best greetings to Russia!! :-)

David Have you finally been successful in repairing your MD441?

Dieter Ein schönes Projekt, der B&K 4230! Er hat es verdient, gerettet zu werden!

Mike Again: Greetings to Russia and all R&S users over there!

Pierangelo Still dealing with your CMS52? My regards to Italy!

Leo Grüße in die Niederlande und immer einen guten Schalter auf Vorrat ;-)

Denis Successful with your Bird4311?

Jörg Tut meine alte Tastaturmatte für den FSE noch? :-)

Rene Was für ein Schnäppchen für einen ESVP!!!

Günter Bist Du mit Deiner Pegelkalibrierung weitergekommen?

Jac Haven't heard any noise from you for a long time now. B3 still humming? ;-)

Wolfgang Nochmals danke für den guten Preis für die Transceiver. So werden für einen guten Zweck genutzt (Signalgenerator zum Test für Endstufen auf dem Messplatz)!

Bernd Schönen Gruß nach München auch an Deine Frau (sie ist eindeutig Deine BESERE Hälfte ;-) und danke für den Anruf zum Neuen Jahr heute :-)

Und weiterhin (seid mir nicht böse, aber ich kann unmöglich zu JEDEM was schreiben):

Horst, Dieter, Andrew, Tobias, Sirenen-Matthias, Marek, Rafal, Hermann, Thomas (der mit dem einsamen Berg an der A2), Erwin, Pietro, Marcin, Christian (und, ist gut im neuen Job?), Ralph (the contact the most far away that I currently have: Tasmania!!), Detlef, Heinzmen und Ralf (danke für den Support bei meinem Revox B215!), Euclides, Stavos (Griechenland), Adri, Dominik, Thomas (Stichwort "Fluke5100"), Hanfried, Ulfried (wieder so ein "Stadtbe-kannter"), Fabian, Guido, Wolfgang, Harald (seine Firma baut auch schöne Mikrofone!), Christer, natürlich Karlheinz!, Alexander, Werner, Walter, Jörg, John-Dieter, Stefan, Rui, Franz, Gerhard, Gilbert (danke für Deine Weihnachtskarte!), Rolf (wann startet endlich die erste bemannte Mission zum Mars?), Ulf, Ingo, Ralf (schön, dass Du Deine webseite wieder angefangen hast, zu pflegen!), Ken (Stichwort "UPL"), Dany, und Bodo.

In Summe sind es weit über 1500Emails, die ich in den zwei Jahren 2014 bis 2016 hier be-antwortet habe und es finden sich Kontakte zu den unterschiedlichsten Ländern der Welt.

Da sage nochmal einer, man könne die Welt nicht kennen lernen, wenn man nur mit einem LötKolben im Keller sitzt!

Ganz besonders bedanken möchte ich mich natürlich für die freundliche Aufnahme in den Bastelkreis, ohne den ich dieses Projekt weder hätte beginnen noch, weiterverfolgen geschweige denn hätte abschließen können! Eure Geduld mit mir zeichnet Euch aus - zusammen mit Eurem Knowhow und einer Bastlerleidenschaft, die ich nur bewundern kann!

Ich wünsche Euch allein ein wahnsinns 2017,
Marc

48 Links

Jörn, DK7JB: [Projekte und Basteltagebücher](#)

Thomas, DG8SAQ: [VNWA Netzwerkanalysator und Audiometer-Software](#)

Bernd, DG4RBF: [der PNTS und weitere Projekte](#)

49 Auflösung

Stooooooooop, es fehlt noch was!

Natürlich die Auflösung des Rätsels aus dem letzten Bericht! Ich habe nach dem mysteriösen Gegenstand gesucht, den die Touris da alle fotografieren!

Also- im dichtesten dran war tatsächlich Jochen, der mit seiner Antwort keine 10m daneben lag! Er tippte auf eine Statue, die es da tatsächlich auch gibt! Mein Respekt zu dieser großartigen Detektivleistung!

Gemeint war jedoch....tataaaa!!!.....



Abbildung 121: Southernmost Point of USA

der südlichste Punkt der USA, der "Southernmost Point" auf Key West, Florida!

Nunja, ganz stimmt das natürlich auch wieder nicht. Der "wirklich" südlichste liegt ein paar hundert Meter weiter rechts auf einem US Army-Stützpunkt, aber da kommt man als normaler Touri natürlich nicht hin. Also drücken wir ein Auge zu und sind mal nicht so kleinlich!

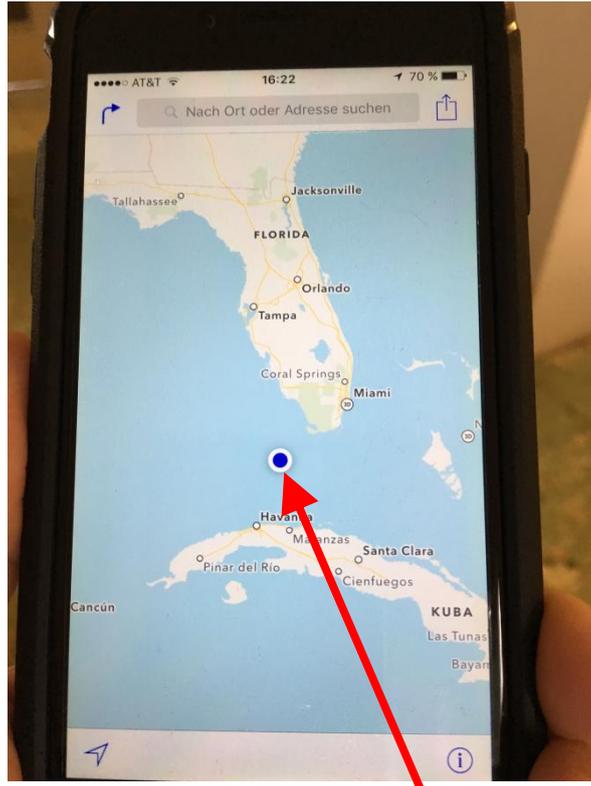


Abbildung 122: da liegt Key West

gesuchter Punkt

Jochens Tipp



Abbildung 123: Bilderrätsel Auflösung

zgedröhnter Tourist

50 Disclaimer

Hinweise

1. Wer auf dieser Grundlage bastelt, bastelt auf eigene Gefahr!
2. Das hier ist ein privat und hobbymäßig zusammengestellter Reparaturbericht. Ich übernehme keine Garantie für die Korrektheit der hier beschriebenen Inhalte.
3. Ich übernehme keine Folgekosten, die durch evtl. Anwendung der hier beschriebenen Informationen entstehen könnten.
4. Das Basteln in elektrischen Geräten kann für nicht Sachkundige ein hohes Risiko von Verletzungen aller Art bedeuten. Sollten Sie nicht sachkundig sein, lassen Sie bitte lieber die Finger davon.
5. Die kommerzielle Nutzung des hier beschriebenen Wissens ist nicht vorgesehen.
6. Alle Meinungsäußerungen (insbesondere über Firmen oder Hersteller) sind stets rein subjektiver Natur und spiegeln nur meine eigenen Erfahrungen oder persönlichen Vorlieben wieder. Sie sind weder als Werbung noch Verunglimpfung dieser Firmen oder Hersteller zu verstehen, sondern als persönliche Meinungsäußerung aufzufassen.
7. Vor dem Veröffentlichenden meiner Berichte bemühe ich mich stets im Vorfeld um eine Zustimmung der in meinen Berichten vorkommenden Personen/ Firmen. Wenn Sie der Meinung sind, dass das in Ihrem Fall einmal (unabsichtlich!) vergessen wurde und über bestimmte Darstellungen oder Beschreibungen verärgert sind, so setzen Sie sich zur Problemlösung bitte zuerst direkt mit mir in Kontakt (und nicht gleich mit Ihrem Anwalt ;-).

Die Berichte wurden von mir nach bestem Wissen und Gewissen erstellt.

Disclaimer

Alle Artikel unterliegen dem deutschen Urheberrecht. Keine unerlaubte Vervielfältigung, Aufführung, Weitergabe, Druck. Eine kommerzielle Nutzung des hier beschriebenen Wissens ist nicht vorgesehen. Weiterhin übernehme ich weder Gewähr für die Richtigkeit der Inhalte noch übernehme ich Haftung für Risiken und Folgen, die aus der Verwendung/Anwendung der hier aufgeführten Inhalte entstehen könnten. Nicht-Sachkundigen rate ich generell von Eingriffen in elektrische Geräten und Anlagen dringend ab! Insbesondere verweise ich auf die strikte Einhaltung der aktuell gültigen Sicherheitsvorschriften von VDE und Berufsgenossenschaft über die elektrische Sicherheit!

Rechtliche Absicherung

Grundsätzlich berufe ich mich bei meinen Dokumenten auf mein Menschenrecht der freien Meinungsäußerung nach Artikel 5, Absatz 1 des Grundgesetzes. Dennoch mache ich es mir zu eigen, von den in den Berichten namentlich vorkommenden Personen vor der Veröffentlichung eine Zustimmung einzuholen. Wenn Sie jedoch der Meinung sind, dass Sie persönlich betroffen sind und das in Ihrem Fall versäumt wurde, und Sie sind darüber verärgert, so bitte ich um eine umgehende Kontaktaufnahme (ohne Kostennote!) mit mir. Das gilt auch für den Fall, wenn meine hier bereitgestellten Inhalte fremde Rechte Dritter oder gesetzliche Bestimmungen verletzen sollten. Ich garantiere, dass die zu Recht beanstandeten Passagen unverzüglich entfernt werden, ohne dass von Ihrer Seite die Einschaltung eines Rechtsbeistandes erforderlich ist. Dennoch von Ihnen ohne vorherige Kontaktaufnahme ausgelöste Kosten werde ich vollumfänglich zurückweisen und gegebenenfalls Gegenklage wegen Verletzung vorgenannter Bestimmungen einreichen.

Haftungshinweise

Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle übernehme ich keine Haftung für die Inhalte externer Links. Für den Inhalt der verlinkten Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich.

Kontakt:

Marc.Michalzik@bymm.de

Dieser Artikel unterliegt dem Urheberrecht. © ®. Alle Rechte vorbehalten. Keine Vervielfältigung, Nachdruck.
2017, Marc Michalzik