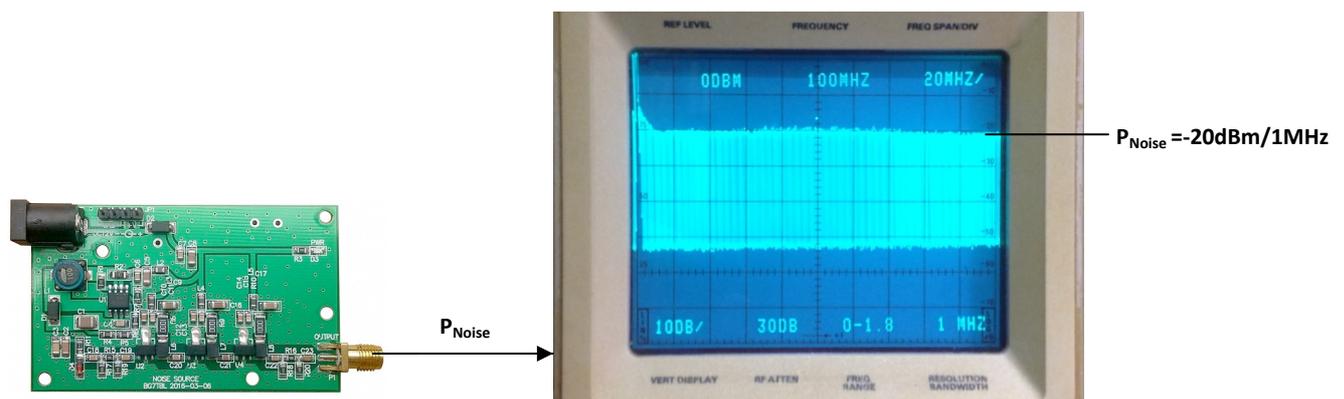


## Messungen mit einem Rauschgenerator

Für Übertragungsmessungen an HF-Filtern und HF-Verstärkern verwendet man in der Regel als Sender einen HF-Generator und als Empfänger einen HF-Tastkopf oder Spektrumanalysator. Ein Diodengleichrichter hat jedoch nur wenig Dynamik und ein Spektrumanalysator (plus Tracking-Generator) ist ziemlich teuer. Alternativ kann man anstelle des HF-Generators für viele Messungen auch einen Rauschgenerator verwenden und anstelle eines teuren Spektrumanalysators einen SDR-Receiver, was besonders für Funkamateure interessant sein dürfte. Nachfolgend werden einige Messbeispiele mit einem Rauschgenerator gezeigt, wie z.B. die Messung der Selektivität, Bandbreite und Welligkeit eines Filters oder die Messung von Empfindlichkeit (MDS) und maximaler Dynamik (NPR) eines Empfängers.

### 1) Rauschgenerator

Ein Rauschgenerator erfüllt im Prinzip die gleiche Aufgabe wie ein Signalgenerator, nur wird kein einzelnes Signal erzeugt, sondern ein kontinuierliches, weißes Rauschband. Für die nachfolgenden Messungen verwende ich ein fertiges Rauschgenerator-Modul von Funkamateureur (€ 39,-), welches ein fast geradliniges Rauschband bis >1GHz liefert.



**Bild 1: Rauschgenerator-Modul mit Rauschsignal von 0 bis 200MHz (gemessen mit einem SA)**

Legt man das Rauschsignal an den Eingang eines Spektrumanalysators (Bild 1), dann wird die Rauschverteilung über der Frequenz angezeigt, im Beispiel von 0 bis 200MHz. Die Leistung des Rauschpegels beträgt  $P_{\text{Noise}} = -20\text{dBm}$ , bezogen auf eine Auflösungsbandbreite (Rauschbandbreite) des Analysators von 1MHz. Die Leistungsangabe eines Rauschpegels (in dBm) ist nur dann gültig, wenn auch die dazugehörige Erfassungsbandbreite (in Hz) mit angegeben wird. Die Leistung des verwendeten Rauschgenerators, bezogen auf 1Hz-Bandbreite, beträgt

$$P_{\text{Noise}/1\text{Hz}} = -20\text{dBm} - 10\log 1\text{MHz}/1\text{Hz} = -20\text{dBm} - 60\text{dB} = -80\text{dBm}/\text{Hz}$$

Daraus kann das ENR = Exzessive Noise Ratio (Rauschüberhöhungsfaktor) des Generators berechnet werden

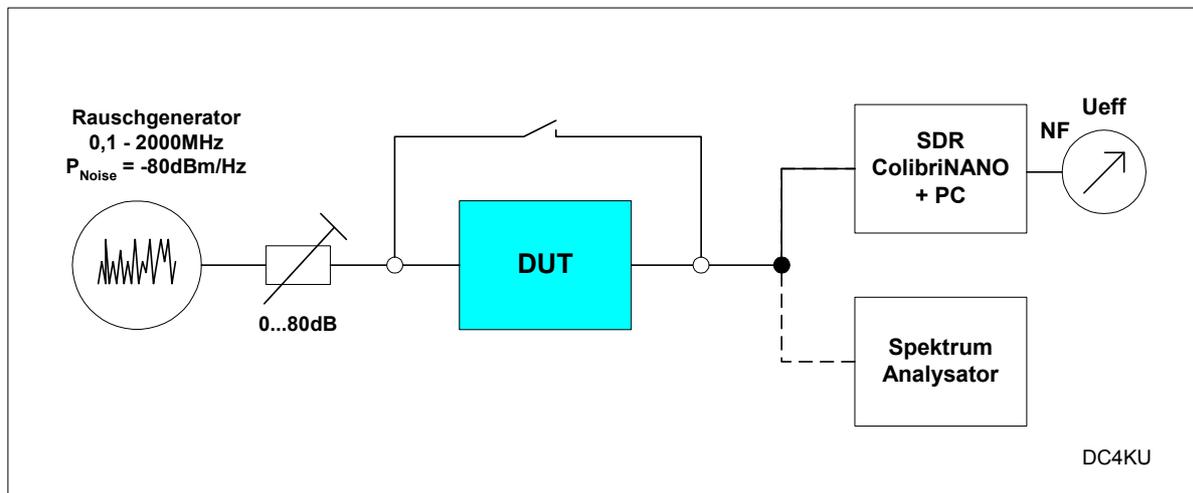
$$\text{ENR} = P_{\text{Noise}}/\text{Hz} - (-174\text{dBm}/\text{Hz}) = -80\text{dBm}/\text{Hz} - (-174\text{dBm}/\text{Hz}) = 94\text{dB}$$

mit:  $-174\text{dBm}/\text{Hz}$  = Grundrauschen eines Widerstands bei  $17^\circ\text{C}$  Zimmertemperatur

Bedeutet, die Rauschleistung des verwendeten Generators liegt um 94dB über dem physikalischen Grundrauschen von -174dBm/Hz.

## 2) Rauschmessplatz

Den prinzipiellen Aufbau meines Rauschmessplatzes für HF-Übertragungsmessungen zeigt Bild 2. Anstelle des einstellbaren HF-Signalgenerators im Frontend, wird jetzt ein breitbandiger HF-Rauschgenerator verwendet.



**Bild 2: Aufbau des Rauschmessplatzes für Übertragungsmessungen**

Als Empfänger (Spektrum-Analysator) verwende ich den Direct-Sampling SDR-Receiver ColibriNANO, der über eine Bandbreite von 55MHz verfügt (Abtastung 122MHz, Auflösung 14Bit). Bei einem künstlich erzeugten Rauschen, besteht grundsätzlich die Gefahr einer Übersteuerung des Empfängers. Legt man das Rauschsignal ohne Dämpfung an den Eingang des SDR, dann müsste er eine kumulative Rauschleistung verarbeiten von

$$P_{\text{Noise}/55\text{MHz}} = -80\text{dBm} + 10\log 55\text{MHz}/1\text{Hz} = -80\text{dBm} + 77,4\text{dB} = -2,6\text{dBm}$$

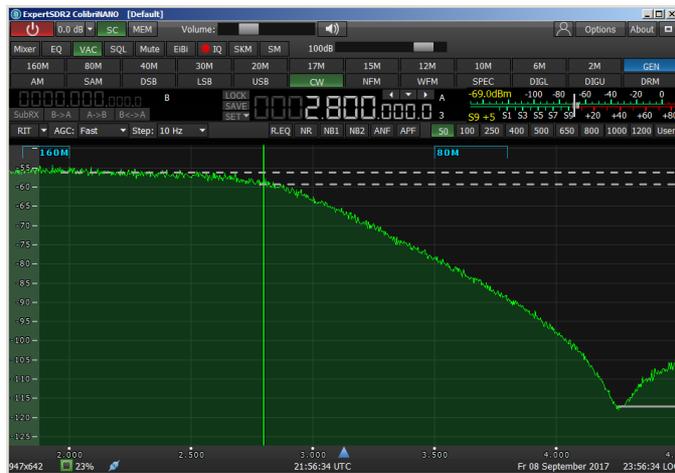
Bei dieser Leistung gerät der SDR allerdings in die Begrenzung (Saturation) und die verwendete Software (ExpertSDR2) zeigt uns dies auch durch die Warnmeldung "Overload ADC" im Display an. Die maximal verarbeitbare Leistung am Eingang des breitbandigen ColibriNANO beträgt bei Gain=0 ca.  $P_{\text{Noise}} = -20\text{dBm}$ . Deswegen muss für Übertragungsmessungen ein  $\geq 20\text{dB}$ -Dämpfungsglied zwischen Generator und SDR geschaltet werden.

Damit Übertragungsmessungen mit der größten möglichen Dynamik durchgeführt werden können, sollte die Dämpfung bei allen Messungen nur so groß eingestellt werden, dass der SDR kurz vor seiner Begrenzung steht. Misst man z.B. die Übertragungskurve eines 1MHz-TP-Filters, dann liegt nur ein Rauschband von 0-1MHz am Eingang des SDR und die Rauschleistung beträgt insgesamt dann nur noch  $P_{\text{Noise}/1\text{MHz}} = -80\text{dBm}/\text{Hz} + 10\log 1\text{MHz} = -20\text{dBm}$  und die vorgeschaltete Dämpfung kann bis auf 0dB reduziert werden.

## 3) Übertragungsmessungen an Filtern

Die Übertragungskurve eines 2,8MHz Tiefpass-Filters zeigt **Bild 3**. Aus der Messkurve kann z.B. der Dämpfungsverlauf (Welligkeit), die Flankensteilheit und die die 3dB-Bandbreite ermittelt werden. Die Messdynamik erreicht fast 60dB, für eine breitbandige Messung ist das ein sehr guter Wert. Wird das

eingespeiste Rauschsignal etwas erhöht, gerät der SDR in die Sättigung, was über die Software im Bildschirm mit der Warnmeldung "Overload ADC" angezeigt wird (**Bild 4**). Die gewählte Rauschleistung sollte in jedem Fall 3...5dB unterhalb der Saturation des SDR (ADC) liegen.



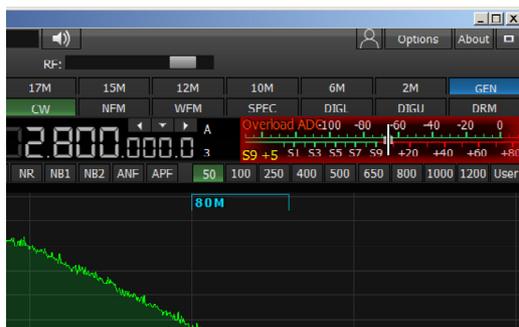
-3dB

>60dB



**Bild 3: Übertragungskurve eines 2,8MHz TP-Filters**

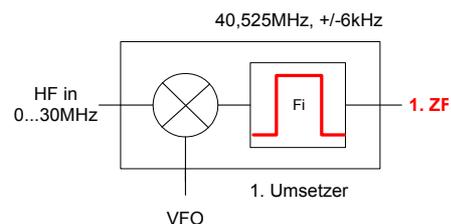
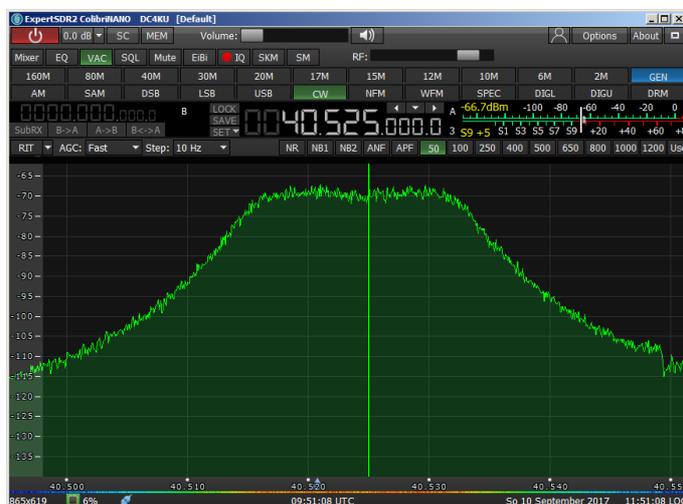
**Test an schaltbaren KW TP-Filtern**



← Warnung bei Übersteuerung

**Bild 4: Bei zu großem Rauschpegel erfolgt eine Übersteuerung des SDR**

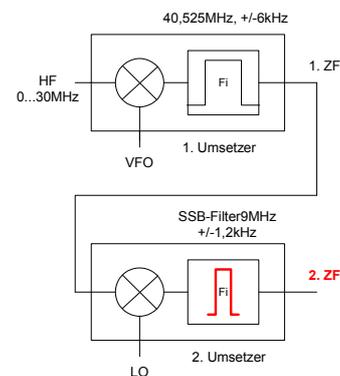
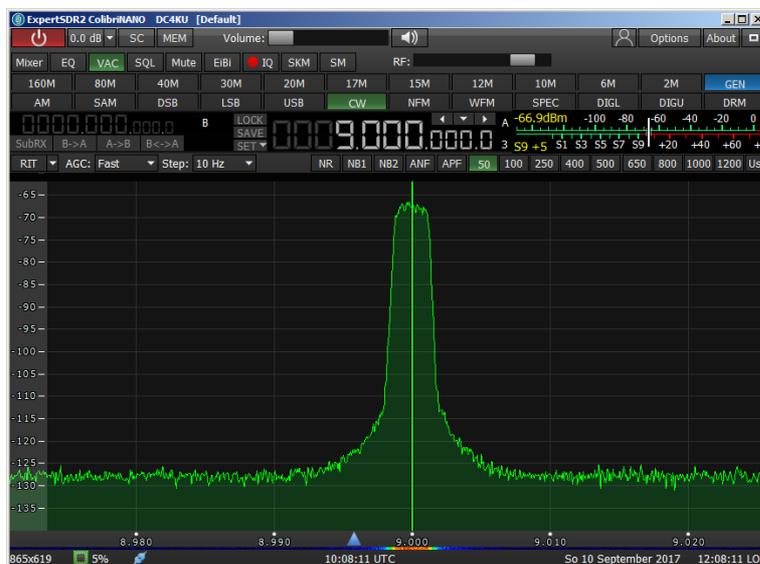
Die nächste Messung zeigt die Übertragungskurve eines 40,525MHz-Quarzfilters (Roofing-Filter), eingebaut im 1. Umsetzer eines KW-Receiver (**Bild 5**). Bei dieser Messung wurde das Rauschsignal in den HF-Eingang des KW-Empfängers eingespeist und am Ausgang der 1.ZF gemessen. Die ermittelte Bandbreite beträgt 12kHz. Obwohl der Empfänger bei dieser Messung auf  $f_e=7,1\text{MHz}$  abgeglichen



**Bild 5: Übertragungskurve eines 12kHz breiten Roofing-Filters (1. ZF)**

war, wird die Übertragungskurve des Roofing-Filters bei 40,525MHz angezeigt. Egal auf welcher Frequenz der Empfänger eingestellt wird, die Übertragungskurve des Roofing-Filters wird immer angezeigt. Diese Meßmethode ist nur mit einem breitbandigen Rauschsignal im Eingang des Empfängers möglich. Zum Testen des Filters auf Bandbreite, Welligkeit und Flankensteilheit muß das Filter nicht aus dem Receiver ausgebaut werden.

Auf die gleiche Weise können die Übertragungskurven der Auflösungsfilter für CW, SSB, AM und FM im 2. Umsetzer des Empfängers gemessen. **Bild 6** zeigt die Messkurve des schmalen 9MHz SSB-Quarzfilters. Bandbreite, Welligkeit und Selektivität des Filters werden im Kurvenverlauf ziemlich genau dargestellt. Lediglich die Weitabselektion des Filters von >100dB kann mit dieser breitbandigen Meßmethode nicht mehr ermittelt werden, dazu wäre eine selektive Messung mit einem Spektrumanalysator plus Tracking-Generator erforderlich.



**Bild 6:** Übertragungskurve eines 2,4kHz breiten 9MHz-SSB-Filters (2. ZF)

#### 4) Messung der Empfindlichkeit (MDS) eines Empfängers mit einem Rauschsignal

Erzeugt ein CW-Signal am Lautsprecherausgang eines SSB-Empfängers einen Signal/Rausch-Abstand von 3dB, dann entspricht der Pegel des CW-Signals dem Grundrauschpegel des Empfängers (**Bild 7**). Anstelle eines CW-Signals, kann man auch ein Rauschsignal verwenden, beide Messungen kommen zum gleichen Ergebnis (**Bild 8**). Die Empfindlichkeit (MDS=Minimum Discernible Signal) eines Empfängers wird in dBm/Hz angegeben und entspricht dem Pegel seines Grundrauschens. Zur Ermittlung des Grundrauschpegels verbindet man den NF-Ausgang des Empfängers mit einem AC-Voltmeter und stellt den Rauschpegel über den Lautstärkereger auf einen relativen Wert von z.B. 100mVeff. Anschließend wird der Empfänger mit dem Rauschgenerator verbunden (**Bild 2**) und der Pegel so weit reduziert, bis das NF-Rauschen am Voltmeter um den Faktor 1,414 ( $20\log U_2/U_1=3\text{dB}$ ) ansteigt, im Beispiel auf  $U_{\text{eff}}=141\text{mV}$ . Beim ColibriNANO erfolgte der 3dB-Anstieg des Rauschens bei einer Dämpfung von 80dB, entsprechend einem Rauschpegel von -150dBm/Hz bzw. 116dBm/2,5kHz.

Empfindlichkeit (MDS) = -116dBm, bei 2,7kHz SSB-Bandbreite und  $f = 7,1\text{MHz}$

Den 3dB-Anstieg des Rauschens kann ebenso aus der angestiegenen Rauschkurve im Display ablesen oder aus der dBm-Anzeige des eingblendeten S-Meters. Ich arbeite aber lieber mit einem Zeigerinstrument ( $U_{\text{eff}}$ ) am NF-Ausgang des Empfängers, weil es mir die etwas "ruhigeren" (gemittelten) Messwerte des Rauschens liefert.

## Einstellungen am ColibriNANO

Frequenz 7,1 MHz, Bandwidth 2,5kHz, Preamp 0dB, RF Gain 100dB, Sample Rate 96kHz

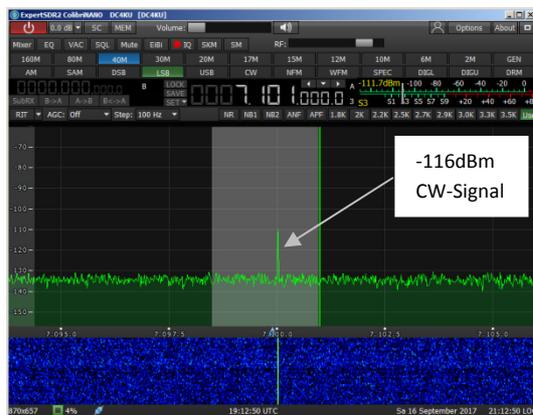


Bild 7:  $S+N/N=2=3\text{dB}$  bei CW-Signal von  $-116\text{dBm}$

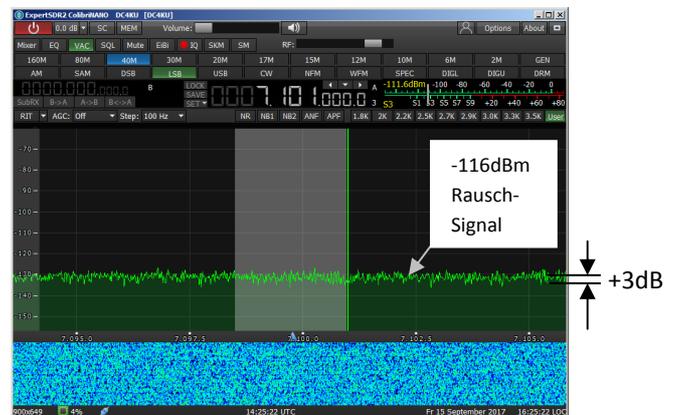


Bild 8: 3dB-Rauschanstieg bei  $P_{\text{Noise}} = -116\text{dBm}$

## 5) Messung der Großsignalfestigkeit eines Empfängers mit einem Rauschsignal (NPR)

Auch die Großsignalfestigkeit von Empfängern kann mit Hilfe eines Rauschsignals getestet werden. Hierbei wird der Eingang des Empfängers - ähnlich wie bei der Empfindlichkeitsmessung - mit weißem Rauschen angesteuert. Bei Erhöhung des Rauschpegels, erzeugt der Empfänger ab einer bestimmten Rauschgröße auch Intermodulationsprodukte, die sich als zusätzliches Rauschen zeigen. Wenn die Größe der entstehenden IM-Produkte den Pegel des Empfänger-Grundrauschens erreicht, ist der maximale Dynamikumfang bzw. das maximale NPR (Noise Power Ratio) des Empfängers erreicht. Damit dieser Punkt im Rauschen messbar ist, schaltet man ein schmalbandiges Notchfilter zwischen Rauschgenerator und Empfänger, im Beispiel wird ein 2,4MHz-Notchfilter verwendet. Das Kerbfilter unterdrückt auf seiner Mittenfrequenz von 2,4MHz (+/-5kHz) sämtliche Signale, wie auch das extern angelegte Rauschen. Im Sockel des Notchfilters verbleibt, wenn der Empfänger nicht übersteuert ist, nur das Grundrauschen des Empfängers.

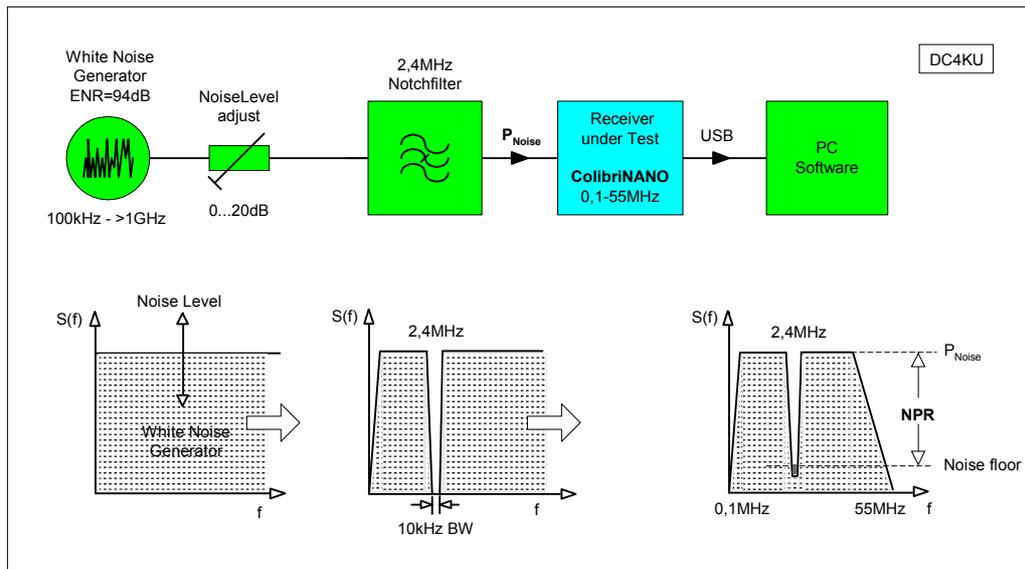
### Bestimmung des NPR von analogen Empfängern:

Der maximale NPR des Empfängers ist dann erreicht, wenn bei Erhöhung des Rauschpegels das Rauschen im Fuß des Notchfilters um 3dB ansteigt. Dieses Rauschen kommt jedoch nicht vom Rauschgenerator, sondern beinhaltet nur die entstandenen Intermodulationsverzerrungen des Empfängers. Der Pegelunterschied zwischen dem Rauschsignal außerhalb des Notchfilters zum Rauschsignal innerhalb des Notchfilter entspricht dem maximalen NPR des Empfängers.

Falls der zu messende Empfänger über kein FFT-Display verfügt, misst man den 3dB-Rauschanstieg im Sockel des Filters über das NF-Rauschen am Lautsprecherausgang ( $S+N/N=3\text{dB}$ ).

### Bestimmung des NPR von digitalen Empfängern (SDR):

Bei SDR-Receiver entsteht das maximale NPR kurz vor Einsatz der Saturation (Begrenzung). Der Rauschpegel wird in 1-dB-Stufen soweit erhöht, bis der ADC in Begrenzung fährt. Die Begrenzung des ADC erkennt man an einem plötzlichen, starken Rauschanstieg im Sockel des Kerbfilters. Wenn dies erfolgt, reduziert man den Rauschpegel wieder um ca. 1...3dB, bis sich der ADC wieder im linearen Bereich befindet. Der resultierende NPR ist aus der FFT-Messkurve im Bildschirm des PCs direkt ablesbar und entspricht der Pegeldifferenz von Rauschleistung innerhalb des Notchfilters zur Rauschleistung außerhalb des Notchfilters.



**Bild 9: Blockschaltbild NPR-Messplatz (oben) mit den entstehenden Rauschkurven (unten)**

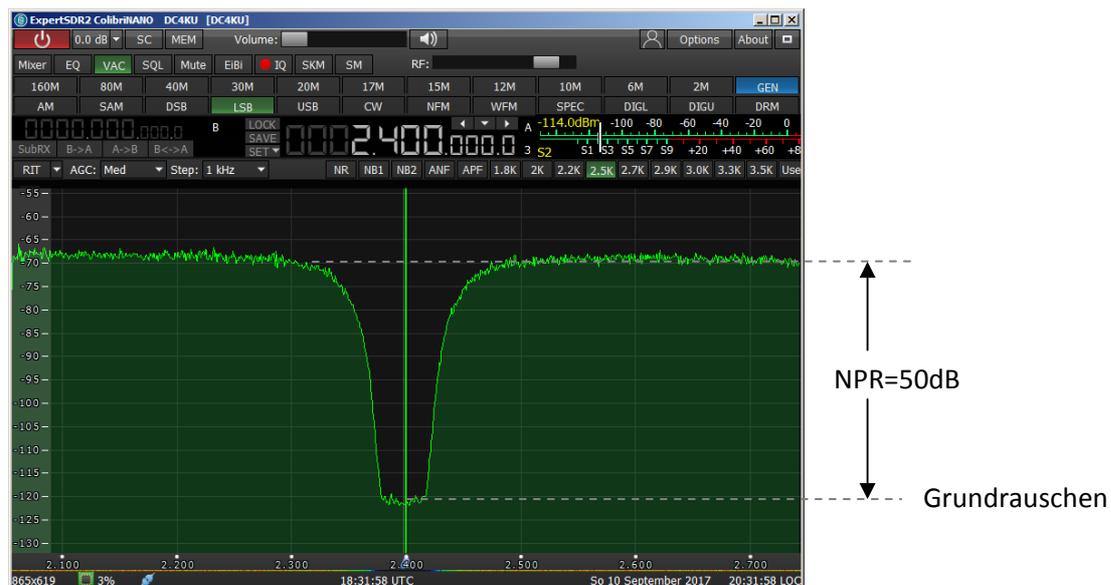
Nachfolgend soll das NPR des verwendeten SDR-Receiver ColibriNANO gemessen werden.

Der Rauschgenerator wird über Dämpfungsglied und Notchfilter (**Bild 9**) mit dem Eingang des SDR verbunden. Der ColibriNANO verfügt über keinen Preselector und hat im Eingang lediglich ein TP-Filter von 55MHz, d.h. er muß das gesamte Rauschband von 0-55MHz verarbeiten. Bei einer Dämpfung des Rauschsignals um 20dB, entsprechend einer Rauschleistung von  $P_{\text{Noise}@55\text{MHz}} = -22,5\text{dBm}$ , befindet sich der SDR kurz vor Saturation und es ergibt sich ein maximaler NPR von 50dB.

NPR = 50dB

Das Resultat der Messung kann direkt aus dem Spektrum in **Bild 10** abgelesen werden.

Einstellungen ColibriNANO: Preamp 0dB, RF 100dB, NR/NB/ANF off, AGC Med, Sampling Rate 768kHz, B=2,5kHz, f=2,4MHz



**Bild 10: NPR-Messung am SDR ColibriNANO**

Der berechnete NPR ergibt

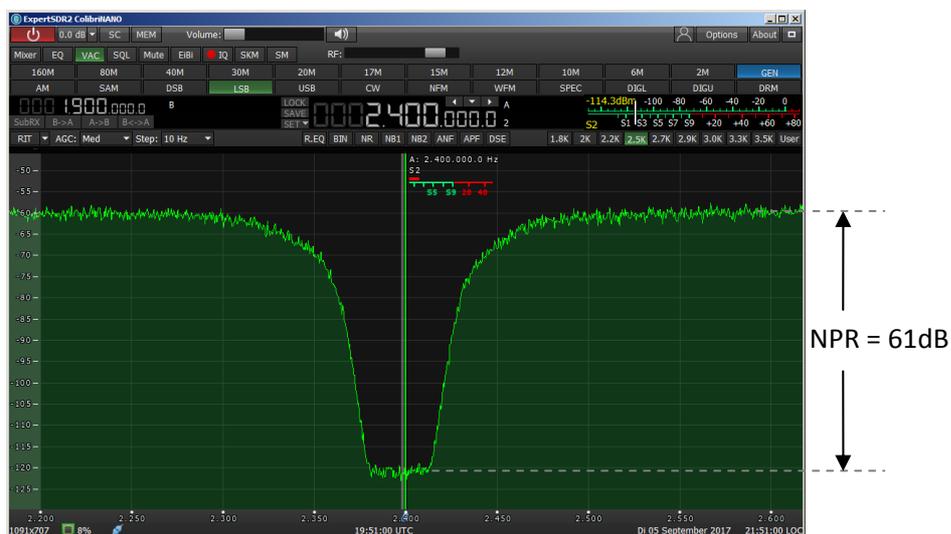
$$\text{NPR} = P_{\text{Noise}@55\text{MHz}} - \text{BWR} - \text{MDS} = -22,5\text{dBm} - 10\log(55\text{MHz}/2,5\text{kHz}) - (-116\text{dBm}) = 50,1\text{dB}$$

mit: BWR = Bandbreitenverhältnis 55MHz/2,5kHz=43,4dB

MDS = Empfindlichkeit -116dBm@2,5kHz

Im ersten Moment erscheint ein Rausch/Leistungsverhältnis von 50dB gering, es ist aber ein respektable Wert. NPR beschreibt den ungünstigsten Fall (Worst Case) einer Empfangssituation, nämlich dann, wenn sämtliche Kanäle des Empfängers von 0-55MHz mit Signalen ausgefüllt sind, mit Ausnahme des Kanals im Notchfilter. Der ColibriNANO besitzt als einzige Selektion im HF-Eingang nur ein 55MHz TP-Filter. Das Rauschen am HF-Eingang verteilt sich also gleichmäßig über einen Frequenzbereich von 0 bis 55MHz, mit einer kumulativen Leistung von  $P_{\text{Noise@55MHz}} = 80\text{dBm/Hz} + 10\log 55\text{MHz} = -2,6\text{dBm}$ . In das Frequenzband von 55MHz passen  $55000\text{kHz}/2,5\text{kHz} = 21960$  SSB-Kanäle und jeder einzelne Kanal wird hierbei mit einem Rauschpegel von -46dBm entsprechend S9+33dB angesteuert.

Im Gegensatz zum üblicherweise durchgeführten "Zwei-Ton-Verfahren", bei dem der Empfänger nur mit zwei HF-Signalen belastet und der theoretische  $IP_3$  daraus berechnet wird, liefert das NPR ein hartes aber unbestechliches Ergebnis des maximalen, intermodulationsfreien Dynamikbereichs eines Empfängers.



**Bild 11: Verbessertes NPR durch TP-Filter im Antenneneingang**

Wenn vor den Antenneneingang des ColibriNANO z.B. ein 3,7MHz TP-Filter geschaltet wird und das Rauschspektrum dadurch von 55MHz auf 3,7MHz begrenzt wird, beträgt das eingespeiste Rauschen nur noch  $P_{\text{Noise@3,7MHz}} = 80\text{dBm/Hz} + 10\log 3,8\text{MHz} = -14,4\text{dBm}$  (vorher -2,6dBm) und das NPR wächst gemessen auf 61dB an (**Bild 11**). Die eingespeiste Rauschleistung von S9+33 pro Kanal bleibt dabei identisch zur vorherigen Messung, nur die HF-Bandbreite im Eingang des Empfängers wurde reduziert. Das zeigt deutlich, dass eine Bandbegrenzung durch TP-Filter im Antenneneingang die Großsignalfestigkeit eines Empfängers verbessern kann.

#### Literatur:

- Messung der Modulation von SSB-Sendern, DC4KU  
CQ-DL 7-2018

Werner Schnorrenberg  
DC4KU

23.10.2017, Rev. 04.07.2018