

## RSP2 - SDR Receiver

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
<b>1. SDRplay RSP - Receiver</b>	<b>1-2</b>
<b>2. Unterschiede RSP2 zu RSP1</b>	<b>3-4</b>
<b>3. Empfindlichkeit und Rauschmaß</b>	<b>5</b>
<b>4. S-Meter und HF-Pegelmessgenauigkeit</b>	<b>6</b>
<b>5. Notch-Filter für AM-/FM-Rundfunksender</b>	<b>8</b>
<b>6. Großsignalverhalten</b>	<b>8-9</b>
<b>7. Intermodulation</b>	<b>10-12</b>
<b>8. NPR-Testverfahren</b>	<b>12-15</b>
Rauschgenerator	
Bandfilter	
Kerbfilter	
<b>8.1 NPR-Messungen</b>	<b>15-16</b>
<b>8.2 NPR eines Spektrumanalysators</b>	<b>16-17</b>
<b>8.3 NPR eines analogen Empfängers</b>	<b>18</b>
<b>8.4 NPR des RSP2</b>	<b>18-20</b>
<b>Verwendete Bauteileteile des NPR-Messplatzes</b>	<b>20</b>

## 1) RSP2 - Wideband SDR Receiver von SDRPlay



RSP2 mit drei HF-Eingängen



RSP1 mit einem HF Eingang

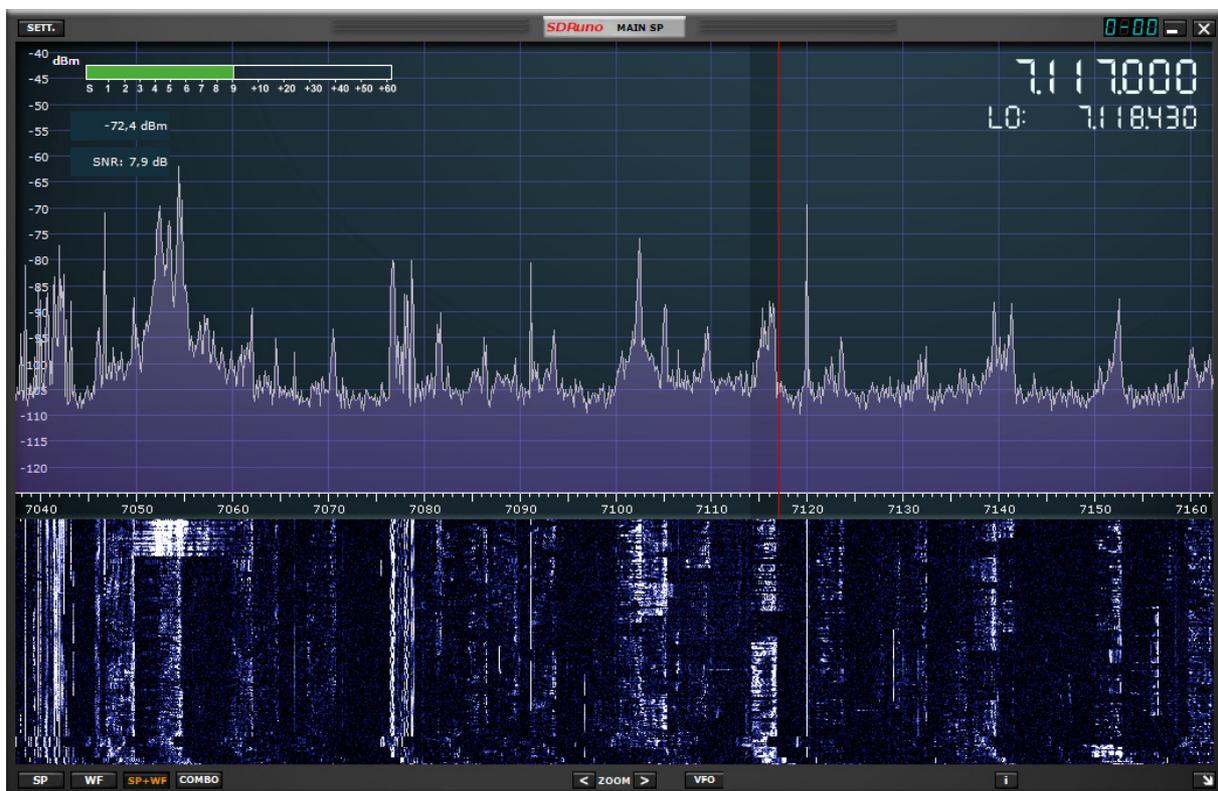


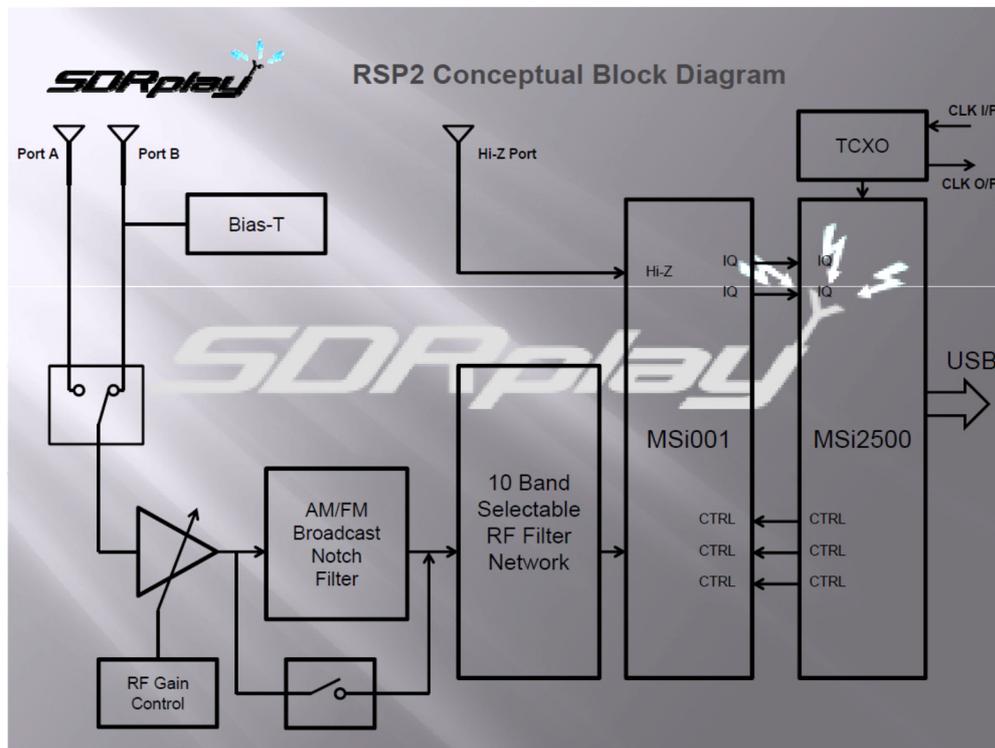
Bild 1: SDRplay-RSP2 mit Software SDRuno

Der RSP2 von SDRplay ist ein leistungsfähiger SDR Empfänger, verbaut in einem robusten und geschirmten Kunststoffgehäuse, mit einem Frequenzbereich von 1 kHz bis 2 GHz und einer Bandbreite von bis zu 10 MHz. Im Gegensatz zum Modell RSP1 verfügt der RSP2 über drei auswählbare Antenneneingänge, darunter auch ein hochohmiger Eingang für Langdrahtantennen. Weiterhin wurde die Frequenzstabilität durch einen eingebauten TCXO verbessert, der mit einer externen Referenz gesteuert werden bzw. selbst als 24-MHz-Frequenznormal dienen kann. Über die Software SDRuno von SDRplay verfügt der RSP2 über ein kalibriertes S-Meter und kann als Leistungsmessgerät mit 100dB Dynamikumfang verwendet werden.

Der RSP2 ist für Multi-Plattform ausgelegt und deckt Windows, Linux, Mac und Android ab. Softwareseitig funktionieren die frei aus dem Internet erhältlichen Programme SDRuno, HDSDR und SDR-Console. SDR# funktioniert zurzeit nur auf dem RDS1.

## Highlights RSP2:

Frequenzbereich von 10 kHz 2000 MHz, bis zu 8 MHz Passbandbreite (10 MHz sichtbar), 12 Bit ADC, 10 eingebaute Preselection-Filter, eingebauter TCXO für erhöhte Frequenzstabilität.

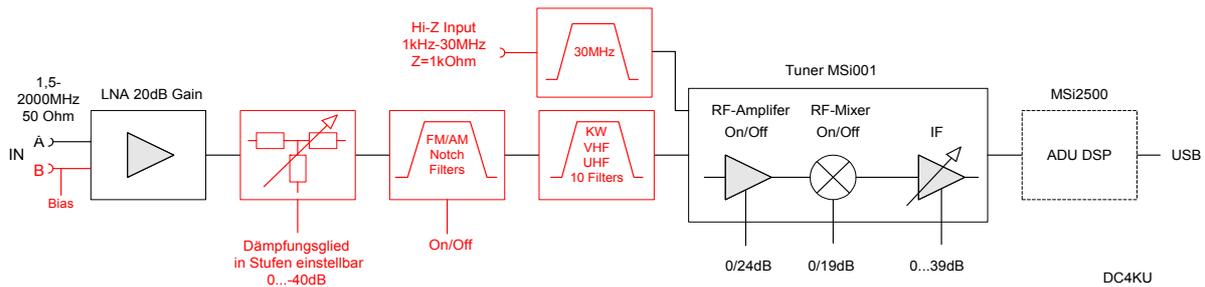


**Bild 2: SDRplay RSP2 Blockschaltbild**

### Technische Daten

- Frequenzbereich: 1 kHz bis 2 GHz
- HF-Port A: 1,5 MHz bis 2 GHz, 40 dB Gain Regelumfang, 50 Ohm
- HF-Port B: 1,5 MHz bis 2 GHz, 40 dB Gain Regelumfang, 50 Ohm, Fernspeisung (Bias T) 4,7 V DC
- Hochimpedanz-Port: 1 kHz bis 30 MHz, 18 dB Gain Regelumfang, 1 kOhm Impedanz (balanced)
- ADC: 12 Bit, 10.4 ENOB, 60 dB SNR, 67 dB SFDR
- Referenz: TCXO hoher Stabilität 0,5 PPM, trimmbar bis auf 0,01 PPM
- IF-Modes: Zero-IF: alle Bandbreiten; Low-IF: <1,536 MHz
- IF-Bandbreiten: 200 kHz, 300 kHz, 600 kHz, 1,536 MHz, 5 MHz, 6 MHz, 7 MHz, 8 MHz
- Fernspeisung (Bias T) auf Port B: per Software schaltbar, 4,7 V/100 mA
- Rauschmaß: 8 dB @ 3 MHz, 2,0 dB @ 10 MHz, 1,6 dB @ 20 MHz, 1,5 dB @ 40 MHz, 1,5 dB @ 100 MHz, 1,9 dB @ 200 MHz, 5,0 dB @ 360 MHz, 2,5 dB @ 600 MHz, 3,5 dB @ 1300 MHz, 4,0 dB @ 1800 MHz
- IP3: +15 dBm @ 3 MHz
- Filter: automatisch (Port A und B), Tiefpass (12 MHz), Bandpässe (12-30 MHz, 30-60 MHz, 60-120 MHz, 120-250 MHz, 250-300 MHz, 300-380 MHz, 380-420 MHz, 420-1000 MHz), Hochpass (1000 MHz); Notchfilter: FM >60 dB 80-100 MHz, MW >30 dB 680-1550 kHz; Tiefpass für Frontend 30 MHz für Hochimpedanz-Anschluss
- Daten-Anschluss: USB 2.0

2) Unterschiede von RSP2 zu RSP1

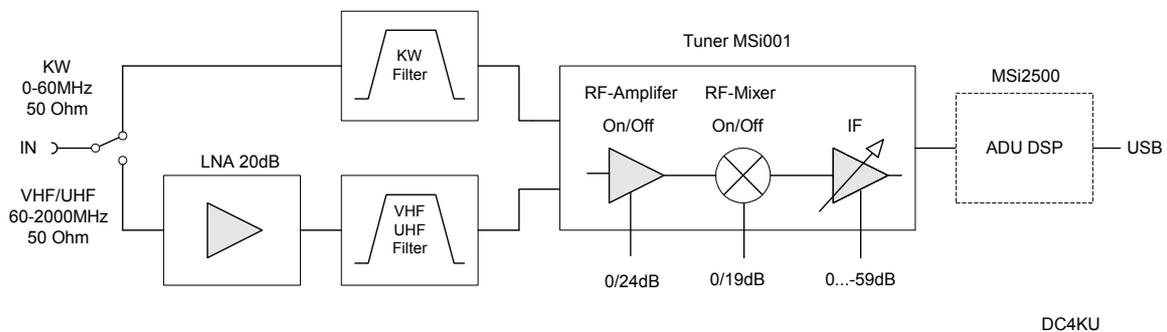


**Bild 3: RSP2-Blockschaltbild analoger Eingang, fe=1,5-2000MHz, Gmax=102dB, GRmax=122dB (Änderungen gegenüber RSP1 rot markiert)**

Die wesentlichen Änderungen im RSP2 betreffen den HF-Eingang und die Regelung (Bild 2). Im RSP1 durchlaufen die KW- und VHF/UHF-Signale noch getrennte Wege, das KW-Signal wird direkt in den Tuner eingespeist und die VHF/UHF-Signale um 20dB vorverstärkt (Bild 3). Beim RSP2 gibt es nur noch einen Front-End LNA mit fester Verstärkung von 20dB Gain, über den sämtliche Signale von 1,5MHz bis 2GHz geleitet (KW bis UHF) werden. Hinter dem Front-End LNA befindet sich ein regelbares Dämpfungsglied 0...40dB, bestehend aus ohmschen Widerständen (T-Dämpfungsglieder) und Pin-Schaltdioden. Dem Dämpfungsglied folgt ein schaltbares Notch-Filter, zum Ausblenden von eventuell störenden FM- und MW-Rundfunksendern.

Die weitere Schaltung ist praktisch wie beim RSP1, es folgen insgesamt zehn Stück schaltbare LP-, BP- und HP-Filter zum ausfiltern einzelner Frequenzbereiche und dann der Eingang zum Tuner-Modul MSi001.

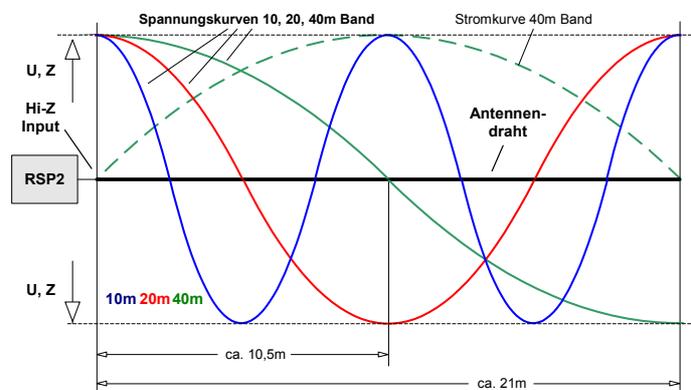
Im Gegensatz zum RSP1, wo von 0-60MHz (KW-Bereich) nur der Tuner-Chip für die Regelung (0-102dB) zuständig ist und kein LNA vorgeschaltet ist, erfolgt im RSP2 ein Großteil der Verstärkungs- bzw. Dämpfungseinstellung über das stellbare Dämpfungsglied (0-40dB) im Frontend. Um die Rauschzahl gering zu halten, wurde das das Dämpfungsglied hinter und nicht vor dem LNA angebracht. Auch die beiden KW-Filter 0-12MHz und 12-30MHz liegen nicht vor dem LNA, sondern dahinter. In dieser Konfiguration erscheint mir der HF-Eingang im KW-Bereich (1-30MHz), wo starke Signale und hohes Grundrauschen auftreten können, etwas kopflastig zu sein.



**Bild 4: RSP1-Blockschaltbild analoger Eingang, fe=0-60MHz (KW), fe= 60MHz-2GHz (VHF/UHF), Gmax=102dB, GRmax=102dB**

Eine weitere Besonderheit des RSP2 (Bild 2) ist ein zusätzlicher, hochohmiger Eingang (1kOhm), der über ein 30MHz TP-Filter (ohne Vorverstärkung) direkt mit dem Eingang des Tuners MSi001 verbunden ist. An

diesem hochohmigen (Hi Z) Eingang könnte man z.B. eine abgestimmte, resonante Langdrahtantenne (HyEndFed) anschließen (1). Da die Antenne im Anschlusspunkt hochohmig (mit Spannungsbauch) ist, braucht man zur Anpassung an den 1 kOhm Eingang keinen Ringkern-Übertrager mehr, sondern kann den Draht direkt und damit verlustfrei an den Hi-Z Eingang anschließen. Ideal für den portablen Betrieb und ein sehr interessanter Eingang, zum Experimentieren!



**Bild 5: Spannungsverlauf einer abgestimmten KW-Drahtantenne am Hi-Z Eingang des RSP2**

### 3) Empfindlichkeit und Rauschmaß

Als Maß der Grenzempfindlichkeit ist der Pegel des Grundrauschens definiert. Die max. Empfindlichkeit eines Empfängers wird dann erreicht, wenn das Eingangssignal die Leistung seines Grundrauschens erreicht, also 3dB über dem Rauschen liegt. Bei der Messung wird das Signal so weit verkleinert, bis der SSB-Überlagerungston am Lautsprecherausgang nur noch einen S+N/N-Abstand von 3dB hat. Der Signal/Rausch-Abstand ist abhängig von der eingestellten Auflösungsbandbreite, je kleiner die Bandbreite umso höher die resultierende Empfindlichkeit, im Beispiel wurde eine SSB-Bandbreite von 2,4kHz verwendet. Folgende Werte wurden an Port A (B) ermittelt:

#### RPS2

RF Gain max, IF Gain max	Frequenz (MHz)	Empfindlichkeit (dBm)	Rauschmaß (dB)
B=2,4kHz	1,5	-120	20
	7	-127	13
	28	-133	7
	145	-137	3
	433	-138	2
	990	-135	5

#### RPS1

RF Gain max, IF Gain max	Frequenz (MHz)	Empfindlichkeit (dBm)	Rauschmaß (dB)
B=2,4kHz	1,5	-120	12
	7	-128	12
	28	-133	10
	145	-136	4
	433	-136	4
	990	-134	6

#### 4) S-Meter und HF-Pegelmessung

##### HF-Pegel Messung

Mit der Software "SDRuno" liefert der RSP2 eine genaue Pegelanzeige in dBm und ein kalibriertes S-Meter von S1 bis S9+40. Anders als sonst üblich, stellt der RDS2 die Pegelgröße der Spektrallinien nicht relativ in "dB" sondern absolut in "dBm" dar und wird somit zu einem selektiven Leistungsmessgerät, einem Spektrumanalysator. Über das Menü "Main Settings -> Cal -> External Front End Gain" läßt sich die Pegelanzeige korrigieren, falls dies erforderlich ist. Nachfolgende Tabelle zeigt die Messgenauigkeit des RSP2 bei 7,1MHz und 435MHz:

fe=7,1MHz		fe=435MHz	
Pegel(dBm)	Messwert(dBm)	Pegel(dBm)	Messwert(dBm)
-10	-9,9	-10	-9,8
-20	-19,0	-20	-20,1
-30	-29,9	-30	-30,0
-40	-39,9	-40	-40,1
-50	-50,0	-50	-50,2
-60	-59,9	-60	-60,1
-70	-70,1	-70	-70,0
-80	-79,9	-80	-79,9
-90	-89,6	-90	-89,8
-100	-94,5	-100	-97,6

Eine Pegelmessung von -10dBm bis -100dBm zeigte einen Messfehler von lediglich +/-0,2dB. Lediglich bei sehr kleinen Signalen entsteht ein Messfehler, wegen der Zunahme des Grundrauschens (S+N).



Bild 9: Pegelmessung bei 7,1MHz: Pe=-20dBm -> Messwert -19,9dBm (links), Pe=80dBm -> Messwert -79,9dBm (rechts)

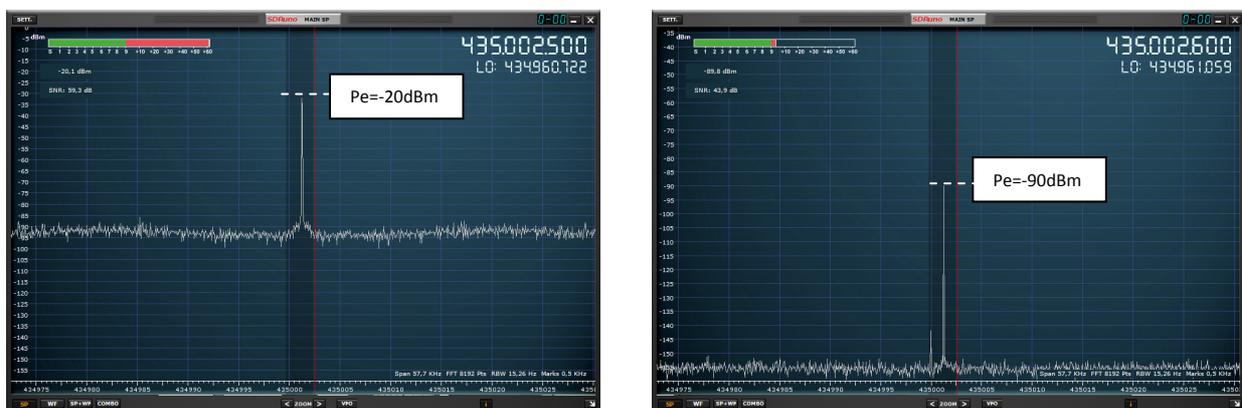


Bild 10: Pegelmessung bei 435MHz: Pe=-20dBm -> Messwert -20,1dBm (links), Pe=-90dBm -> Messwert -89,8dBm (rechts)

### S-Meter Genauigkeit

Mit gleicher Genauigkeit funktioniert die S-Meter Anzeige, unabhängig von gewählter Verstärkung bzw. Gain-Reduction. Getestet wurde das S-Meter auf Kurzwellen und VHF/UHF bei 7,1MHz und 435MHz, mit den Signalpegeln für S3 und S9. Tabelle 1 zeigt die "Soll-Anzeige" für CW-Signalpegel bei S3 und S9.

S-Meter	KW	VHF/UHF
S3	-109dBm	-129dBm
S9	-73dBm	-93dBm

Tabelle 2: Pegel für S3 und S9 auf KW und VHF/UHF

Die fehlerfreie S-Meter-Anzeige des RSP2 im KW- und VHF/UHF-Bereich zeigen die Bilder 11 und 12.

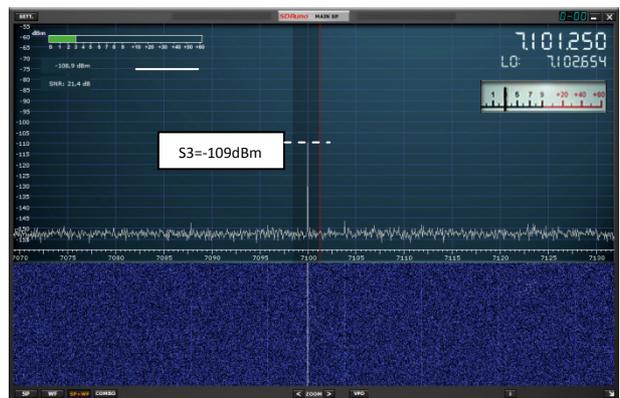
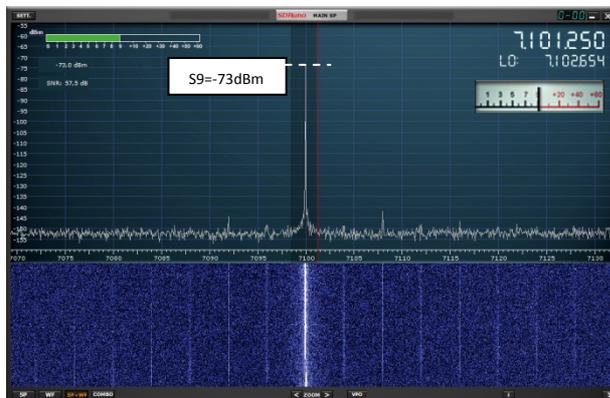


Bild 11: S-Meter-Anzeige bei 7,1MHz für S3 (-109dBm) und S9 (-73dBm)

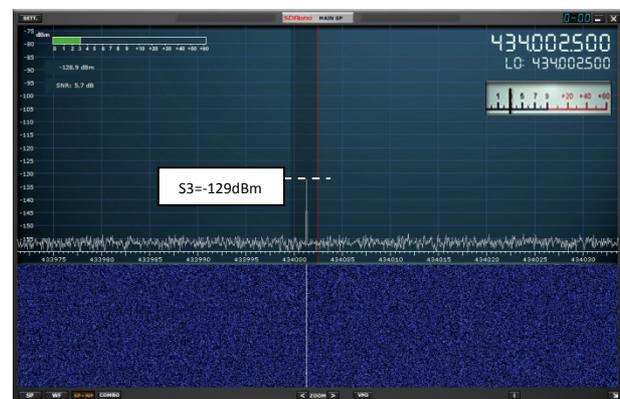
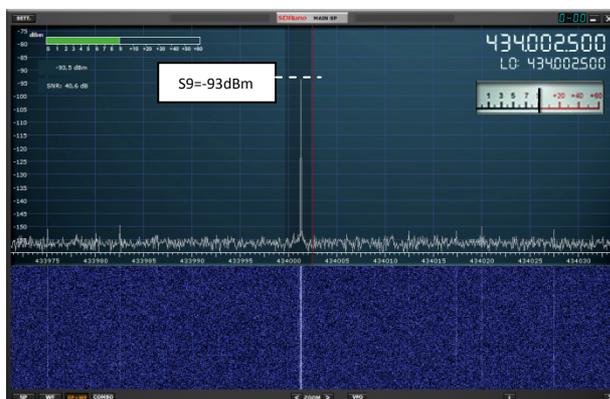


Bild12: S-Meter-Anzeige bei 434MHz für S3 (-129dBm) und S9 (-93dBm)



Bild 13: RX-Control von SDRuno mit eingblendetem S-Meter

## 5) Notch-Filter für AM-/FM-Rundfunksender

Eine weitere, sehr sinnvolle Funktion des RSP2, ist das zuschaltbare Notch-Filter, welches die Rundfunksender im AM- und FM-Band wirkungsvoll unterdrückt. Das Notch-Filter läßt sich im Main-Menü von SDRuno zu- oder abschalten. Bild 14 und 15 zeigt die Wirkung des Filters im FM UKW-Rundfunkbereich bei 93...102MHz.

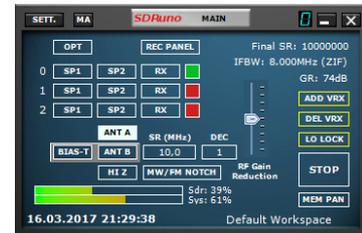
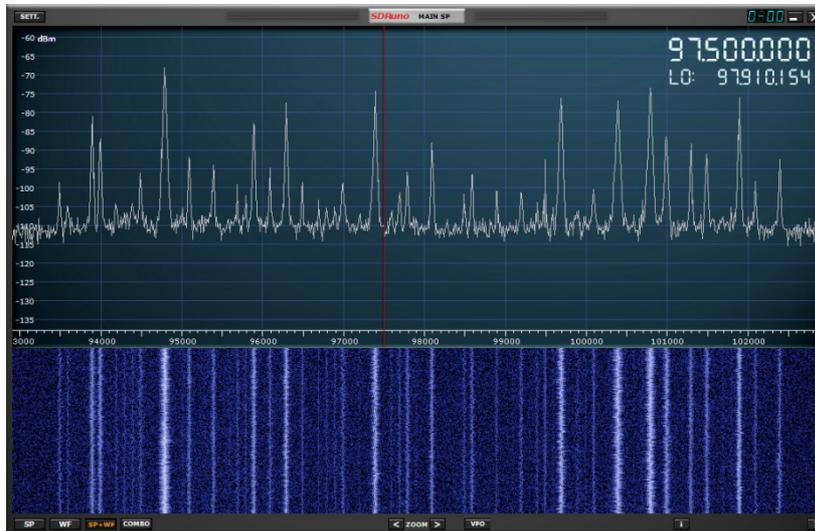


Bild 14: Empfangenes FM-UKW-Rundfunkband, ohne Notch-Filter

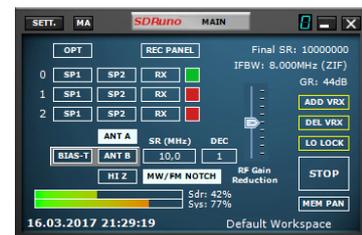
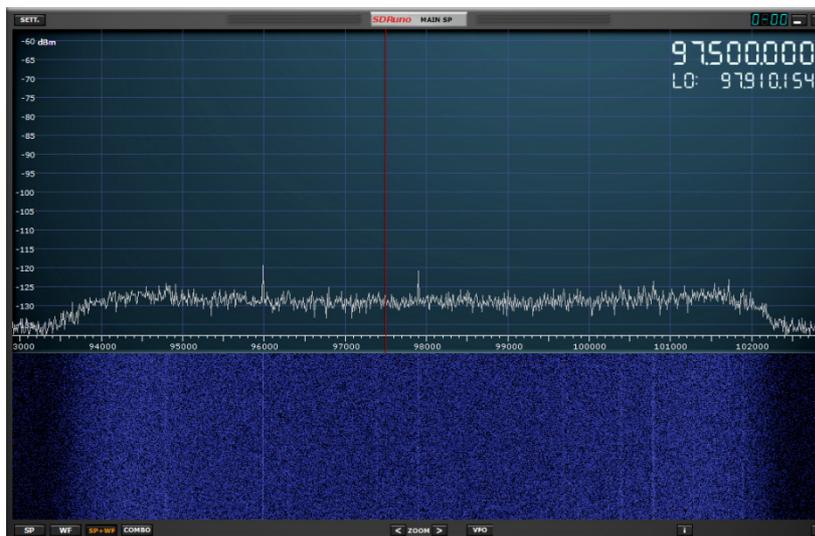


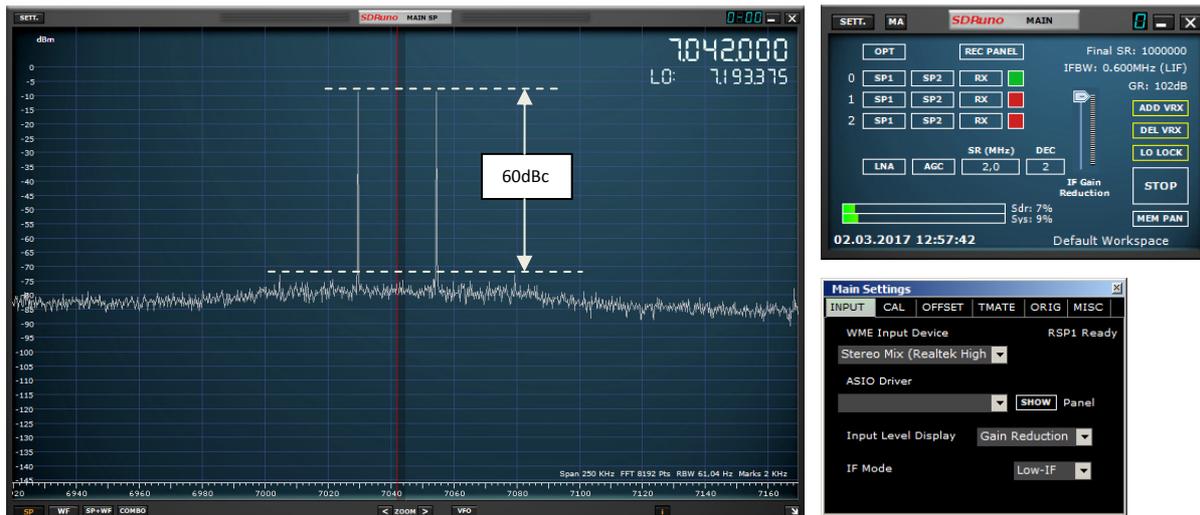
Bild 15: Empfangenes UKW-Rundfunkband, mit Notch-Filter

## 6.) Großsignalverhalten

Die Intermodulation wird mit Hilfe zwei gleich großer Nutzsignale ( $P_e$ ) gemessen, im Beispiel auf den Frequenzen  $f_1=7,030\text{MHz}$  und  $f_2=7,055\text{MHz}$ . Beide Signale werden bis auf eine Leistung von  $P_e=2x -12\text{dBm}$  erhöht, so dass die entstehenden IM-Produkte im Bildschirm deutlich sichtbar werden. Die Gain-Reduction des RSP1/2 wurde bei dieser Messung auf ihren maximalen Wert eingestellt.

### RSP1

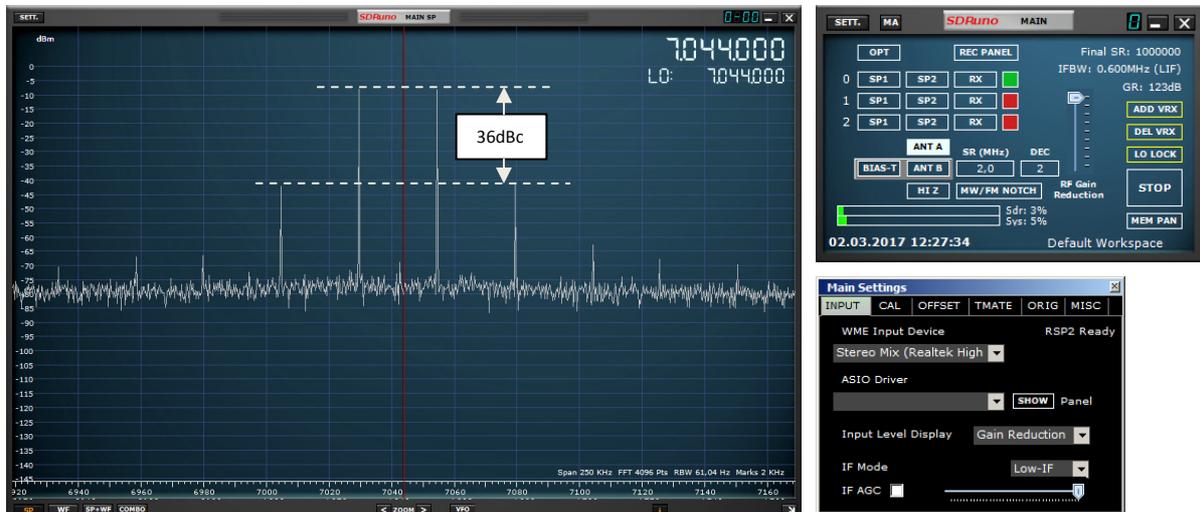
Der RSP1 erzeugt bei  $P_e=2x-12\text{dBm}$  noch keine messbaren IM-Störungen. Der IM-freie Dynamikbereich beträgt gut  $60\text{dBc}$ . Würde man hieraus den  $\text{IP}_3$  berechnen, käme man auf einen Wert von  $+18\text{dBm}$



**Bild 6: RSP1, Intermodulation bei  $P_e = 2x-12dBm$  und  $GR=102dB$ :  $IM3 = 60dBc$ ,  $IP3 = +18dBm$**

**RSP2**

Der RSP2 erzeugt bei der gleichen Einstellung  $IM3$ -Produkte im Abstand von nur  $36dBc$  zu den Nutzprodukten. Würde man aus diesem Messergebnis den  $IP3$  berechnen, käme man auf einen Wert von  $+6dBm$ . Die sichtbaren  $IM$ -Produkte werden jedoch nicht von der ADC hervorgerufen, sondern vom analogen Frontend-LNA. Die HF-Dämpfung hinter dem LNA beträgt  $40dB$  und die ZF-Verstärkung ist auf ihren kleinsten Wert eingestellt, so dass die ADC in keinem Fall übersteuert wird. Eine Signaländerung von  $1dB$  erzeugt jedoch eine Amplitudenänderung der  $IM3$ -Produkte um  $3dB$  (kubischer Verlauf).



**Bild 5: RSP2, Intermodulation bei  $P_e = 2x-12dBm$  und  $GR = 123dB$ :  $IM3 = 36dBc$ ,  $IP3 = +6dBm$**

Ergebnis: Im RSP2 entstehen  $IM$ -Störprodukte früher, als im RSP1. Schon deswegen wäre es vorteilhaft, wenn der LNA im Frontend des RSP2 - zumindest auf den KW-Bändern - abschaltbar (überbrückbar) wäre. Der Hi-Z Port (Bild 2) arbeitet zwar ohne vorgeschalteten LNA, sein Eingang ist aber hochohmig ( $1k\Omega$ ) und ein  $50\Omega$ -Koaxkabel läßt sich ohne Z-Transformation dort nicht anschließen.

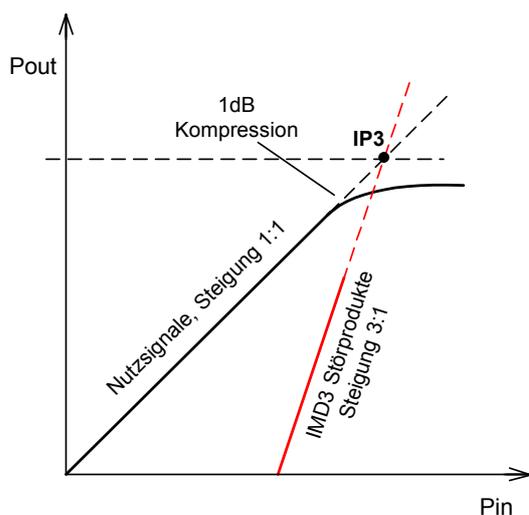
Tipp: Um auf Kurzwelle auf Port A und Port B vor Übersteuerungen sicher zu sein, würde ich zumindest auf den unteren KW-Bändern, ein  $10...20dB$  Dämpfungsglied zwischen Antenne und HF-Eingang schalten. Damit sind die Probleme eventueller Übersteuerung vom Tisch (4).

## 7) Intermodulation

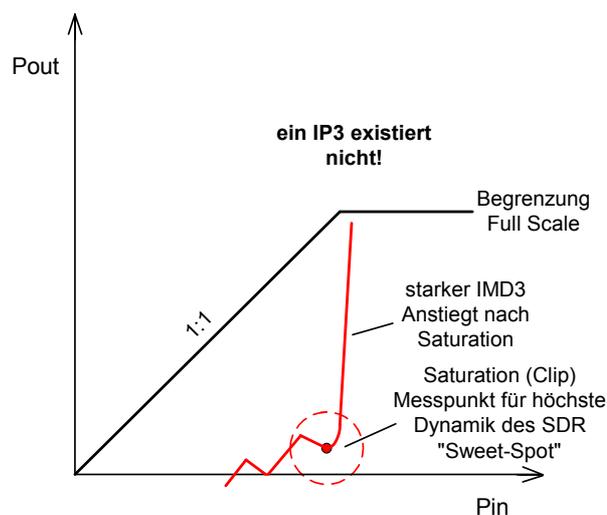
Der IP3 ist ein theoretischer Schnittpunkt, bei dem sich die Übertragungskennlinien der Nutzsingale und IM3-Störsingale kreuzen. Mit Hilfe des **IP3** kann die Aussteuergrenze (P<sub>max</sub>) eines **analogen Receivers** für intermodulationsfreien Empfang berechnet werden und bei Kenntniss des Grundrauschens auf den maximalen Dynamikbereich geschlossen werden.

Anders sieht die Situation bei **A/D-Wandlern** aus. Bei ADC's kann der IP3 nicht mehr zur Berechnungen von Aussteuergrenze und Dynamik herangezogen werden und führt beim Vergleich mit analogen Konzepten zu falschen Ergebnissen, weil kein mathematischer Zusammenhang mehr besteht. Die entstehenden IM-Produkte eines A/D-Wandlers folgen nicht mehr den definierten Gesetzmäßigkeiten des quadratischen (IP2) oder kubischen (IP3) Anstiegs. Vielmehr spielt der Intermodulationsabstand eine wesentliche Rolle, da er im Gegensatz zu analogen Receivern durch Pegeländerungen kaum beeinflusst wird, aber stark abhängig ist vom augenblicklich zu verarbeiteten Signalgemisch (Antenne).

Im Testaufbau wurden zwei HF-Singale mit gleichem Pegel auf den Eingang des SDR gegeben. Ab einer bestimmten Pegelgröße und abhängig von der eingestellten Verstärkung des SDR, tauchen die ersten IM3-Produkte aus dem Grundrauschen auf, ähnlich wie bei analogen Empfängern. Bei Signalerhöhung, steigen die IM3-Produkte jedoch nicht schneller an als die Nutzprodukte, sondern verbleiben bei ihrem Pegel. Manchmal sinken die IM3-Produkte sogar bei wachsenden Nutzsignalen. Würde man an diesen Stellen den IP3 nach der bekannten Formel  $IP3 = \Delta IM3/2 + P_e$  berechnen, wäre das Ergebnis falsch. Die entstehende Messkurve (Bild 7, b) erlaubt es demnach nicht, den IP3 daraus zu bestimmen, aber der IM3-freie Dynamikbereich kann daraus ermittelt werden.



**Bild 7: a) IM3 bei analogen Empfängern**



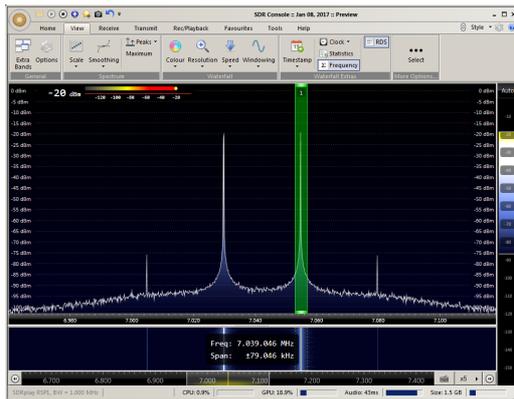
**b) IM3 bei Empfängern mit ADC im Eingang**

Eine nicht vorhandene Steigung der IM3-Kurve des SDR zeigt, dass die IM3-Produkte nicht von den analogen Komponenten (Vorverstärker, BP-Filter) herrühren, sondern von der ADC selbst. Das Spektrum zeigt lediglich die entstehenden Intermodulationsprodukte des ADC, die durch Quantisierungsfehler bei der Digitalisierung und den nachfolgenden Rechenoperationen auftreten. Mit "Dithering" können diese Fehler gemindert werden, indem ein zusätzliches, gleichmäßiges Rauschsignal dem ADC zugeführt wird. Der ADC ist ein nichtlineares Bauteil, dessen Linearität sich prinzipiell nicht über den IP3 bestimmen lässt, weil die IM3-Produkte bei Signalvergrößerung nicht kubisch ansteigen. Erst kurz vor Saturation, bevor das Signal begrenzt, wachsen die IM3-Produkte sehr schnell an. Ab dieser Stelle - oder früher - können aber auch analoge Baugruppen, wie ein vorgeschalteter LNA oder die analogen Bandpaßfilter für die Zunahme der IM-Produkte mit verantwortlich sein. Die größte Dynamik eines ADC wird kurz vor

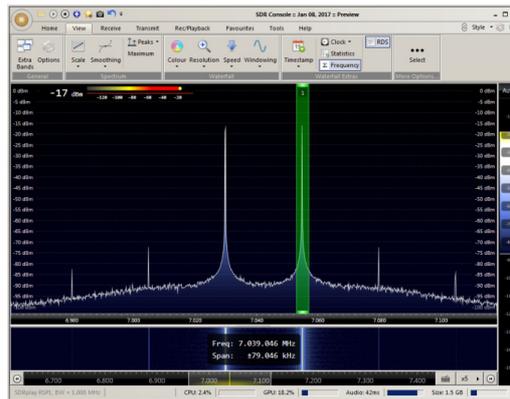
Saturation (Clipping) erreicht. Viele Hersteller berechnen bei diesem Punkt den IP3 des Receivers, der an dieser Stelle Werte von +30...40dBm erreichen kann. Der IP3 hat zwar für diesen Punkt seine Richtigkeit, für alle anderen Pegel ist er jedoch nicht mehr gültig!

### Ergebnisse von IP3-Messungen am SDRplay

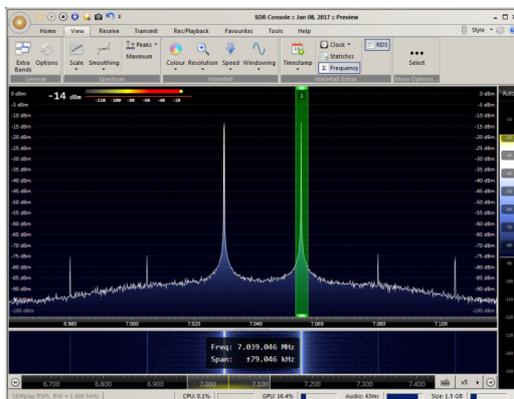
Nachfolgende Bilder zeigen die unterschiedlichen IP3-Messwerte am Beispiel des SDRplay RSP1, in Abhängigkeit der Größe der Eingangssignale. Bei  $f_1=7,030$  und  $f_2=7,055$  MHz werden die Nutzsignale, ausgehend von 2x-20dBm, in 3dB Stufen bis auf 2x-8dBm erhöht. Grundeinstellung am SDRplay: Gain Reduction maximal und LNA Off. Unter SDR-Console: Referenzpegel auf 0dBm (1mW) einstellen.



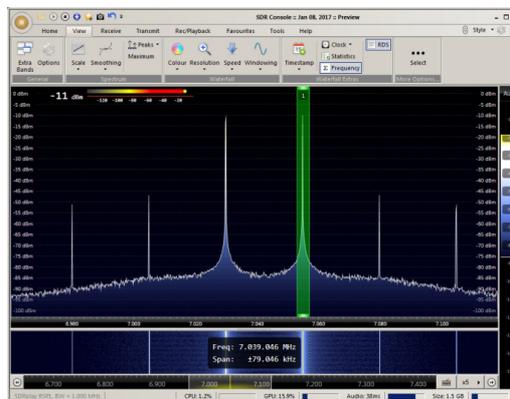
Pe=2x-20dBm,  $\Delta IM3=56$ dB, IP3=8dBm



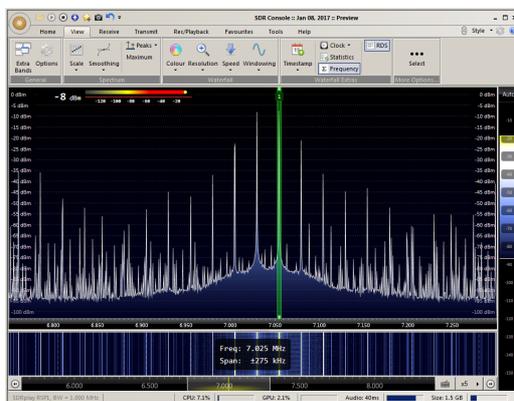
Pe=2x-17dBm,  $\Delta IM3=55$ dB, IP3=11dBm



Pe=2x-14dBm,  $\Delta IM3=62$ dB, IP3=17dBm!



Pe=2x-11dBm,  $\Delta IM3=36$ dB, IP3=7dBm



Pe=2x-8dBm, ADC in Begrenzung

Bilder 8: IP3-Abhängig vom Signalpegel

Deutlich erkennbar ist, dass die IM3-Produkte bei Erhöhung der Signalpegel von -20dBm auf -14dBm kaum ansteigen. In keinem Fall hat die Zunahme der IM3-Produkte demnach einen kubischen Verlauf. Bei  $P_e=2x-14dBm$  liegen die Nutzsignale kurz unterhalb der Saturation und bei dieser Aussteuerung erreicht der RDS auch seine größte Dynamik. Würde man den IP3 hieraus berechnen, käme man auf einen Wert von +17dBm. Bei  $P_e=2x-8dBm$  fährt die ADC in Begrenzung und die Verzerrungsprodukte werden sehr groß. Aus den völlig unterschiedlichen IP3-Resultaten in Abhängigkeit vom Eingangspegel, erkennt man die Sinnlosigkeit einer IP3-Angabe.

$P_e$	$\Delta IM3$	(IP3)
2x-20dBm	56dB	8dBm
2x-17dBm	55dB	11dBm
<b>2x-14dBm</b>	<b>62dB</b>	<b>17dBm</b>
2x-11dBm	36dB	7dBm
2x-8dBm	19dB	0dBm

**Bild 9: Ergebnisse der IM3-Messungen aus Bild 8**

Trotz der beschriebenen Problematik, wird der IP3 von ADC's und SDR's in Datenblättern oft mit angegeben, obwohl er für weitere Berechnungen, wie die Rückrechnungen auf Dynamik und  $P_{max}$ , nicht nutzbar ist. Er gibt dem Anwender anscheinend jedoch ein "Bauchgefühl" für die Großsignalfestigkeit seines Empfängers. Im Datenblatt des SDRplay RSP2 gibt der Hersteller z.B. einen IP3 von +15dBm @ 3MHz bei min. Es fehlt jedoch die Angabe des Pegels, bei dem dieser IP3 gemessen wurde.

Anmerkung: Entstehenden Verzerrungen im SDR-Receiver können sowohl vom analogen Teil des SDR bestimmt werden (LNA, Filter), als auch vom Blocking des ADC. Welcher Teil verantwortlich ist, kann geprüft werden. Wenn ein 2-Ton-Signal um 5dB vergrößert wird und die IM3 wächst um 15dB, dann sind die analogen Baumgruppen vor dem ADC dafür verantwortlich.

## 8.) NPR-Testverfahren

Es wurde gezeigt, dass die "Standard" IP3-Messung mit zwei Signalen bei einem SDR-Receiver zu keinen relevanten Ergebnissen führt. Als eine Alternative gilt das aus der Nachrichtentechnik bekannte NPR-Testverfahren (Noise Power Ratio), mit dem der maximal verfügbare, verzerrungsfreie Dynamikbereich eines HF-Empfängers (analog oder digital) erfasst werden kann. Anstelle von einzelnen Sinussignalen wird der Eingang des Empfängers mit dem breitbandigen, weißen Rauschen eines Rauschgenerators beaufschlagt (Bild 10), über einen definierten Frequenzbereich von z.B. 1 bis 6MHz (5-MHz-Rauschband) Bei einer SSB-Kanalbandbreite ( $B_F$ ) von 2,4kHz werden demnach 2083 Kanäle gleichmäßig mit Rauschen ausgefüllt. Zusätzlich schaltet man ein schmalbandiges und steiles Notch-Filter (Kerbfiler) in die Mitte des Rauschbandes (z.B. bei 2,4MHz) und filtert damit das Rauschen an dieser Stelle komplett aus. Wird der Empfänger auf die Sperrfrequenz des Filters abgeglichen und durch das Rauschen rechts und links vom Notchfilter nicht übersteuert, dann empfängt er kein externes Rauschen mehr und zeigt stattdessen nur sein eigenes Grundrauschen an, mit einem Pegel von z.B. -126dBm.

Anschließend erhöht man den externen Rauschpegel soweit, bis das Grundrauschen des Empfängers etwas ansteigt. Das jetzt messbare, zusätzliche Rauschen kommt jedoch nicht vom Rauschgenerator, es sind Störsignale (Intermodulationsprodukte) des Empfängers, die in den Nutzkanal des Kerbfilters fallen.

Bei einem Rauschanstieg von +3dB erreichen die Störsignale den Grundrauschpegel des Empfängers. Die Differenz zwischen dem eingestellten Pegel des Rauschgenerators ( $P_{TOT}$ ) und dem Grundrauschen des Empfängers (MDS) entspricht dem NPR.

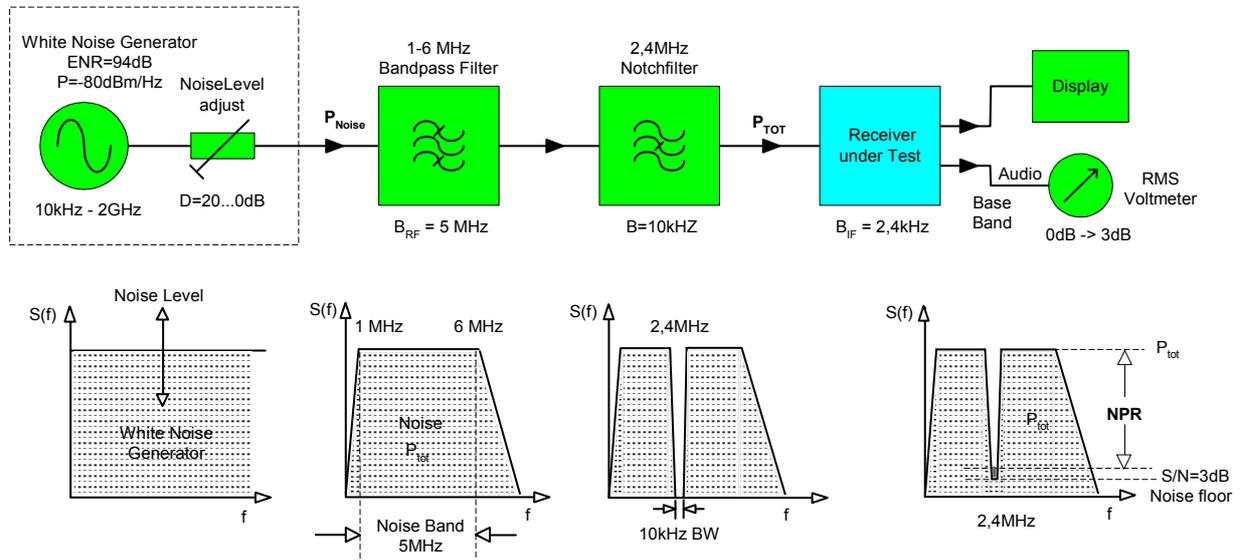


Bild 10: NPR-Messaufbau

### Rauschgenerator

Für die nachfolgenden NPR-Messungen wurde ein Rauschgenerator-Modul bis 3GHz von FA verwendet. Das Modul verwendet eine 24-V Z-Diode als Rauschquelle (DC-UP-Converter auf der Platine) und nachgeschaltet 3 kaskadierte MMICs als Breitbandverstärker (Bild 11). Dem Rauschgenerator folgt ein 0...40dB stellbares Dämpfungsglied, zur Anpassung des Rauschpegels. Bild 11 zeigt den Pegel des Rauschsignals im Bereich von 0...100MHz bei 0dB Dämpfung. Bei niedrigen Frequenzen (ca. 2MHz) liegt der Rauschpegel ziemlich hoch, bei fast 0dBm, bezogen auf 100kHz Bandbreite, um dann im weiteren Verlauf bis 200MHz auf ca. -20dBm abzufallen. Erst ab ca. 50MHz verläuft die Kurve fast geradlinig.

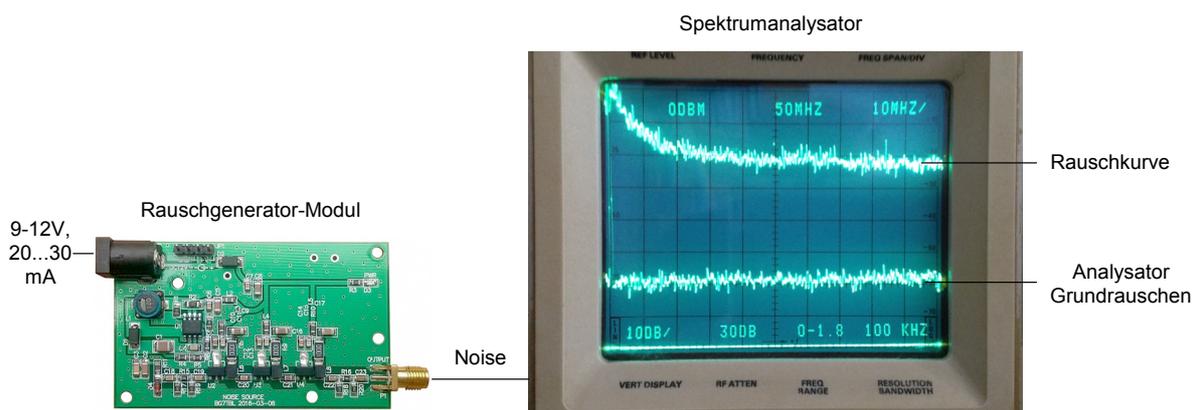


Bild 11: Rauschpegel des Rauschgenerator-Moduls

Zur Linearisierung der Rauschkurve bei tiefen Frequenzen, habe ich im Ausgang ein parallel geschaltetes C/R-Glied eingefügt (33pF, 2kOhm), so dass sich anschließend eine fast gerade Rauschlinie bis 100MHz ergibt mit  $P_{Noise} = -30dBm$  pro 100kHz Rauschbandbreite (Bild 12). Der Generator zieht bis zu 30mA und kann ziemlich warm werden, deswegen sollte er mit einem kleinen Kühlkörper vor Überhitzung geschützt werden.

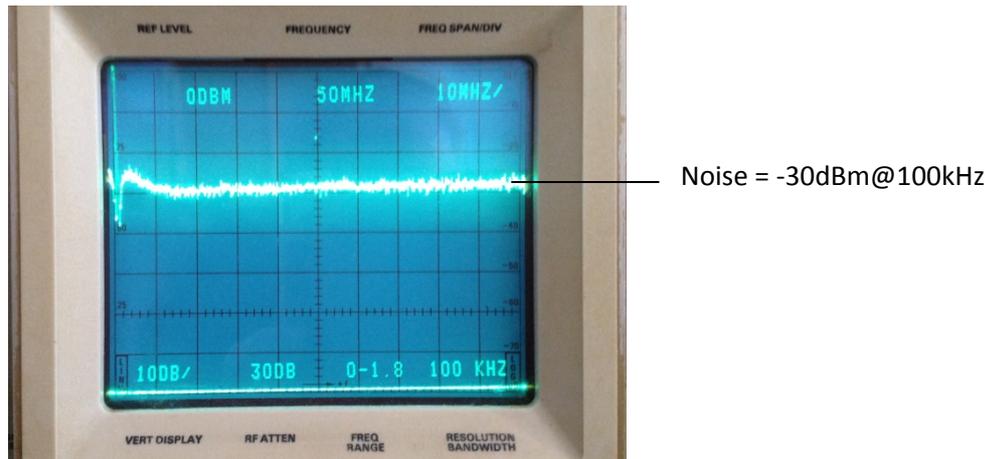


Bild 12: Linearisierte Rauschkurve von 0-100MHz,  $P_{\text{Noise}} = -30\text{dBm}$

Bezogen auf 1Hz-Bandbreite beträgt die Rauschleistung

$$P_{\text{Noise}} = -30\text{dBm} - (10\log 100000\text{Hz})\text{dB} = -80\text{dBm}@1\text{Hz}$$

Aus der Rauschleistung pro 1Hz kann das ENR (Exzessive Noise Ratio = Rauscherhöhungsfaktor), eine wichtige Kennzahl des Rausch-Generators, berechnet werden. Das ENR gibt an, um wie viel mehr der Generator rauscht, als das thermische Grundrauschen eines Widerstands bei  $-174\text{dBm}/\text{Hz}$ .

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

Ohne Angabe einer Messbandbreite (Rauschbandbreite), darf ein Rauschpegel nicht angegeben werden. Die maximale Rauschleistung des Generators bezogen auf einige typische Bandbreiten, beträgt:

$$5\text{MHz}: P_{\text{Noise}@1\text{Hz}} + 10\log 5\text{MHz} = -80\text{dBm} + 67\text{dB} = -13\text{dBm}$$

$$100\text{kHz}: P_{\text{Noise}@1\text{Hz}} + 10\log 100\text{kHz} = -80\text{dBm} + 50\text{dB} = -30\text{dBm}$$

$$10\text{kHz}: P_{\text{Noise}@1\text{Hz}} + 10\log 10\text{kHz} = -80\text{dBm} + 40\text{dB} = -40\text{dBm}$$

$$2,4\text{kHz}: P_{\text{Noise}@1\text{Hz}} + 10\log 2,4\text{kHz} = -80\text{dBm} + 34\text{dB} = -46\text{dBm}$$

$$1\text{Hz}: P_{\text{Noise}@1\text{Hz}} = -80\text{dBm}$$

### Bandpaßfilter

Hinter dem Rauschgenerator und Dämpfungsglied wird das breitbandige Rauschen zunächst mit Hilfe eines Bandpasses auf eine Bandbreite von  $B_{\text{RF}} = 5\text{MHz}$  begrenzt. Der kumulative Rauschpegel in diesem 5MHz breiten Band beträgt bei 0dB-Dämpfung

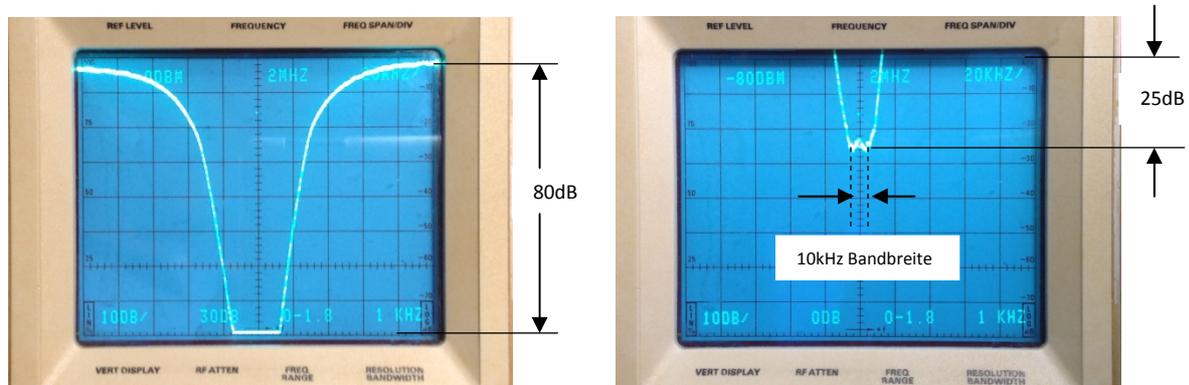
$$P_{\text{TOT}@5\text{MHz}} = P_{\text{Noise}@1\text{Hz}} + 10\log B_{\text{RF}} = -80\text{dBm} + 10\log 5 \times 10^6 = -80\text{dBm} + 67\text{dB} = -13\text{dBm}$$

Gibt man dieses Signal auf den Eingang eines SSB-Empfängers mit einem  $B_{\text{IF}}$  von 2,4kHz (SSB-BB), dann verteilt sich das Rauschen gleichmäßig auf  $B_{\text{RF}}/B_{\text{IF}} = 5000/2,4 = 2083$  einzelne Kanäle und die Belastung pro Kanal beträgt  $P_{\text{TOT}@2,4\text{kHz}} = -13\text{dBm} - 10\log 2,4 \times 10^3 = -47\text{dBm}$  entsprechend einer S-Meter Anzeige von S9+26dB pro Kanal!

### Notchfilter

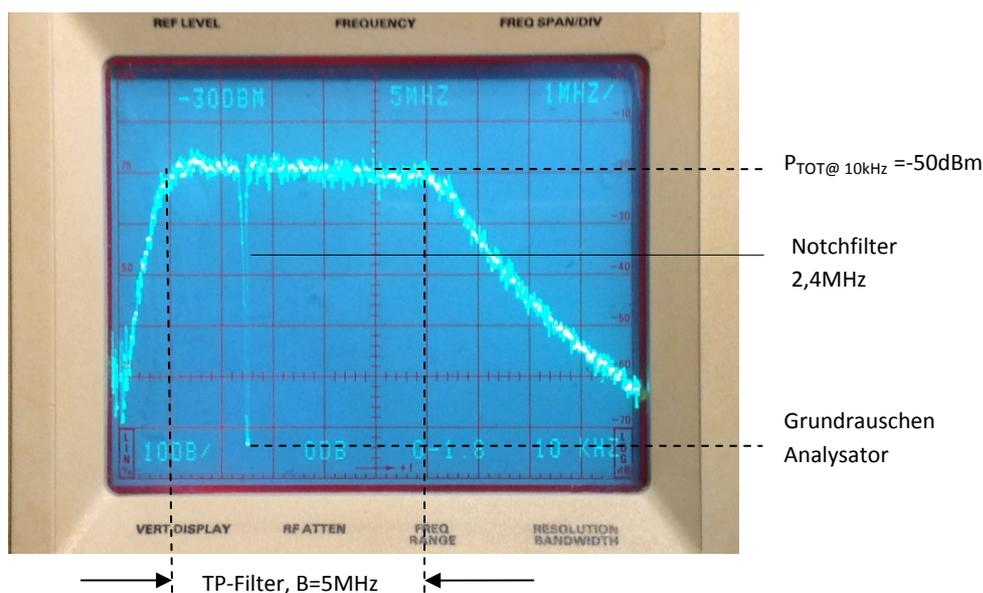
Dem Bandpass folgt ein 2,4MHz-Notchfilter, welches für die NPR-Messung verantwortlich ist. Das Notchfilter muß das externe Rauschen so weit unterdrücken, dass es auf seiner Sperrfrequenz bei 2,4MHz von einem angeschlossenen Empfänger nicht mehr detektierbar (messbar) ist. Damit das

funktioniert, ist eine Sperrdämpfung von ca. 100dB erforderlich. Die mit einem Tracking-Generator und Spektrumanalysator gewobbelte Übertragungsfunktion des Filters zeigt Bild 13, die Dämpfung im Sockel beträgt 105dB und die Bandbreite etwa 10kHz.



**Bild 13: Notchfilter Übertragungsfunktion, Dämpfung 80dB + 25dB = 105dB, die Bandbreite im Sockel des Notchfilters beträgt ca. 10kHz**

Das fertige Spektrum am Ausgang des NPR-Messplatzes, bei einer Dämpfung von 10dB, zeigt Bild 14. Die Leistung des Rauschsignals beträgt  $P_{TOT} = -50\text{dBm}@10\text{kHz}$  und die unterdrückende Wirkung (Kerbe) des Notchfilters, ist im Bildschirm noch zu erkennen.



**Bild 14: Spektrum am Ausgang des Messplatzes,  $P_{TOT@10\text{kHz}} = -50\text{dBm}$**

### 8.1) NPR-Messung

Die NPR-Messung läuft ähnlich ab, wie die Messung der Empfindlichkeit eines Empfängers. Der Empfänger wird auf die Mittenfrequenz des Notchfilters eingestellt und der Pegel des Rauschgenerators so weit erhöht, bis die gemessene, relative NF-Rauschspannung ( $U_{eff}$ ) am Lautsprecher-Ausgang des Empfängers um 3dB ansteigt. Das jetzt messbare Rauschen im Sockel des Notchfilters kommt jedoch nicht vom Rauschgenerator, sondern sind Störsignale, die durch Intermodulation und Nichtlinearitäten außerhalb des Notchfilters entstehen und in Nutzkanal fallen. Steigt das Rauschen im Filterboden auf einen Wert von 3dB oberhalb des zuvor gemessenen Empfänger-Grundrauschens an, dann erreichen die Störprodukte den Pegel des Grundrauschens und die max. Dynamik des Empfängers ist erreicht. Die

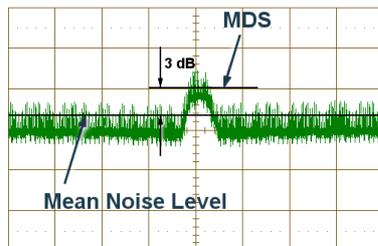
Differenz zwischen dem jetzt eingestellten Pegel des Rauschgenerators ( $P_{TOT}$ ) und dem um 3dB angewachsen Grundrauschpegel (MDS) entspricht dem NPR.

$$\text{NPR} = P_{TOT} - \text{MDS}$$

mit:  $P_{TOT}(B_{IF})$  = erforderliche Rauschleistung für ein S+N/N von 3dB

MDS = Pegel des Empfänger-Grundrauschens

$B_{IF}$  = ZF-Bandbreite des Empfängers (Rauschbandbreite)



**Bild 15: MDS, kleinstes detektierbares Signal (Bild von Averse)**

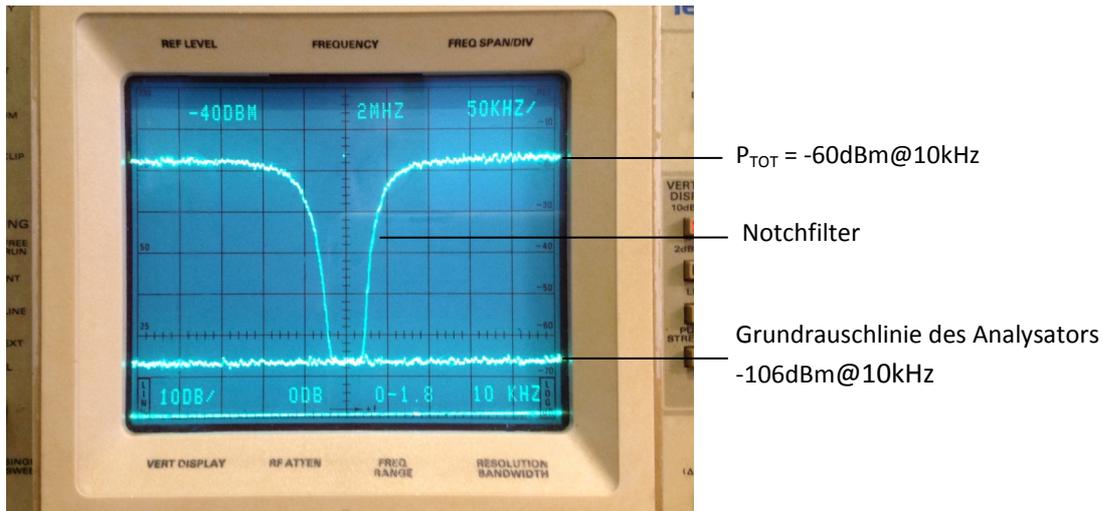
Anmerkung: Das NPR ist hartes, ultimatives Messverfahren, weil der Empfänger hierbei mit nicht nur zwei Signalen, wie bei einer IM3-Messung, belastet wird, sondern gleichzeitig auf hunderten Kanälen mit identisch großen Signalen angesteuert wird. Dieser Fall mag in der Praxis nicht auftreten, es ist ein Extremfall mit einem "Worst Case" Ergebnis. Der über das NPR ermittelte verzerrungsfreie Dynamikbereich liegt im Regelfall unterhalb der Ergebnisse einer IM3-Messung.

## 8.2) Messung des NPR an einem Spektrumanalysator



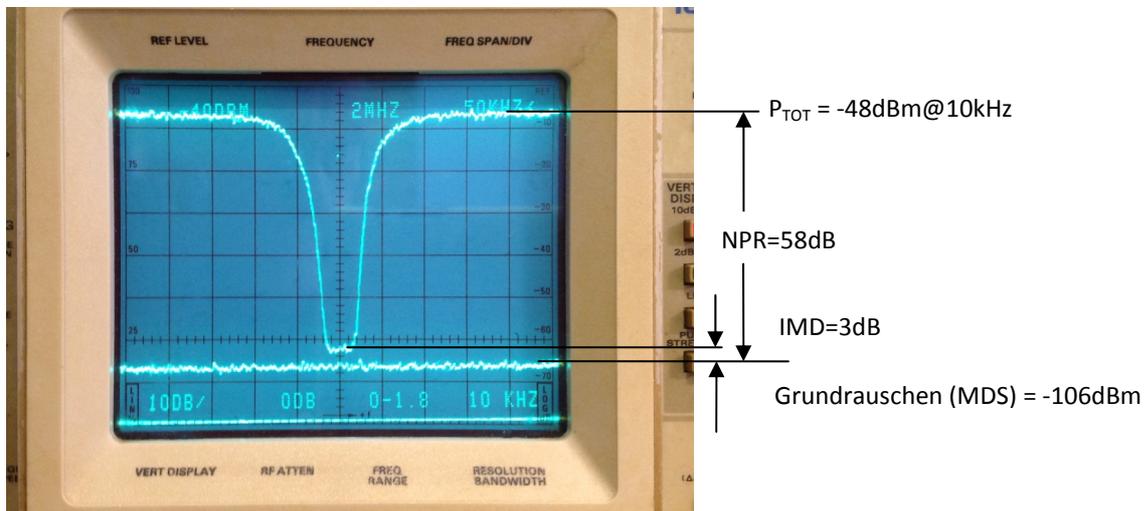
Zunächst messe ich das NPR meines Spektrumanalysators. Ein Analysator eignet sich gut für eine NPR-Messung, weil er die Übersteuerung und das erreichbare NPR direkt an seinem Bildschirm anzeigt. Zuerst gleichen wir den Analysator auf die Mittenfrequenz des Notchfilters ab und erhöhen die Frequenzauflösung auf 50kHz/Teil bei einer Auflösung von 10kHz, so dass der Verlauf des Filters im Bildschirm gut zu erkennen ist (Bild 16).

Die Ausgangsleistung des Rauschgenerators wird zunächst um 20dB gedämpft, auf einen Wert von  $P_{TOT} = -60\text{dBm}@10\text{kHz}$ . Bei dieser Rauschleistung befindet sich der Analysator noch in seinem linearen Bereich und erzeugt keine IM-Störprodukte. Dies erkennt man am Bildschirm, wenn der Sockel des Kerbfilters deckungsgleich mit dem Grundrauschen des Analysators ist. Der Analysator empfängt an dieser Stelle nur sein eigenes Grundrauschen, im Beispiel bei  $-106\text{dBm}$ .



**Bild 16: Aufgelöstes Notchfilter, der Boden des Kerbfilters verschwindet im Grundrauschen**

Dann vergrößern wir das Rauschsignal (Dämpfung verkleinern) in 1dB-Schritten soweit, bis ein Rauschanstieg im Sockel des Notchfilter erkennbar wird (Bild 17). Diese jetzt sichtbaren, zusätzlichen Rauschanteile entstehen ausschließlich durch Nichtlinearitäten und IM-Produkte des Analysators (im 1. Mischer), die in den freien Nutzkanal des Notchfilters fallen. Bei einer Erhöhung des Rauschpegels bis auf  $P_{TOT} = -48\text{dBm}@10\text{kHz}$  (Reduzierung der Dämpfung um 12dB) steigt das Rauschen im Sockel des Notchfilters um insgesamt 3dB an Damit erreichen die Störsignale den gleichen Pegel, wie das Grundrauschen des Analysators und der Analysator erreicht seinen maximalen, verzerrungsfreien Dynamikbereich. Dies ist die Grenze der Aussteuerung des Analysators für einen linearen Betrieb.



**Bild 17: Rauschanstieg um 3dB im Boden des Notchfilters bei  $P_{TOT} = -48\text{dBm}@10\text{kHz}$**

Das NPR entspricht der Differenz von ( $P_{TOT}$ ) und MDS und kann direkt vom Bildschirm abgelesen werden

$$\text{NPR} = P_{TOT@10\text{kHz}} - \text{MDS} = -48\text{dBm} - (-106\text{dBm}) = 58\text{dB}$$

Wird  $P_{TOT}$  bezogen auf 5MHz-Bandbreite (BRF) angegeben, muss das Bandbreitenverhältnis  $B_{RF}/B_{IF}$  mit angegeben werden und die die Berechnung des NPR erfolgt nach der Gleichung

$$\text{NPR} = (P_{TOT@5\text{MHz}} - \text{BWR}) - \text{MDS} = (-21\text{dBm} - 27\text{dB}) - (-106\text{dBm}) = 58\text{dB}$$

mit:  $P_{TOT(5MHz)} = P_{Noise@10kHz} + 10\log 5MHz@10kHz = -48dBm + 27dB = -21dBm$   
 $BWR = 10\log B_{RF}/B_{IF} = 10\log 5000kHz/10kHz = 27dB$   
 $MDS = -106dBm$  (Grundrauschen des Analysators)

Die NPR-Messung kann ebenso mit 1kHz- oder 100Hz-Auflösungsbandbreite durchgeführt werden, das Ergebnis bleibt gleich. Der Hersteller des Analysators (TEK 492P) gibt einen verzerrungsfreien Dynamikumfang  $IM_3$  von 80dB an.

### 8.3) NPR eines analogen KW-Empfängers



Daten des KW-Empfänger: Empfindlichkeit =  $-128dBm@2,4kHz$ , HF-Eingang 0-30MHz,  $IP_3 = +30dBm$   
 Die Messung erfolgt nach Aufbau in Bild 1, allerdings wird zur Bestimmung des NPR jetzt das NF-Rauschen des Empfängers gemessen. Hierzu schaltet man ein Voltmeter an den Lautsprecherausgang des Empfängers, gleicht auf 2,4MHz ab (LSB oder USB) und stellt die NF-Ausgangsspannung über den Lautstärkereger auf eine relative Spannungsgröße ( $U_{eff}$ ) von "0dB" ein. Dann schließt man den Rauschgenerator an und erhöht die Rauschleistung (verkleinert die Dämpfung) soweit, bis NF-Ausgangsspannung am Voltmeter um Faktor 1,414 ( $20\log U_2/U_1=3dB$ ) ansteigt.  
 Bei einer Dämpfung von 13dB, entsprechend einer Rauschleistung von  $P_{TOT} = -59dBm@2,4kHz$ , vergrößerte sich das NF-Rauschen im Sockel des Notchfilter um 3dB. Daraus berechnet sich ein maximaler, verzerrungsfreier Dynamikbereich von

$$NPR = P_{TOT@2,4kHz} - MDS = -59dBm - (-128dBm) = 69dB$$

mit:  $P_{TOT}$  = erforderlicher Rauschpegel für ein S+N/N von 3dB  
 $MDS$  = Empfänger Empfindlichkeit

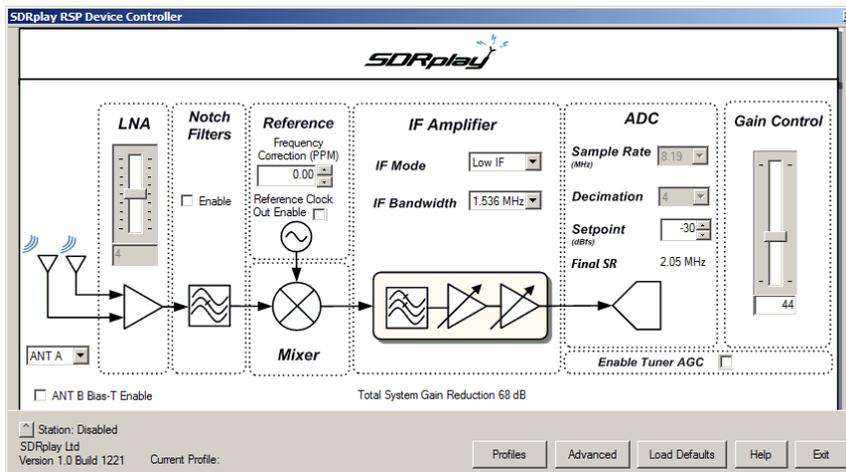
Anmerkung: Gemessen mit einem HF 2-Ton-Generator, erreicht der KW Empfänger einen  $IM_3$ -Abstand von 80dB. Hieran erkennt man, dass die NPR-Messung ein sehr hartes Messverfahren ist. Der Empfänger wird eben nicht nur mit 2 Nutzsinalen belastet, sondern mit  $5000kHz/2,4kHz = 2083$  Signalen.

### 8.4) NPR eines digitale Empfängers, SDRplay RSP2

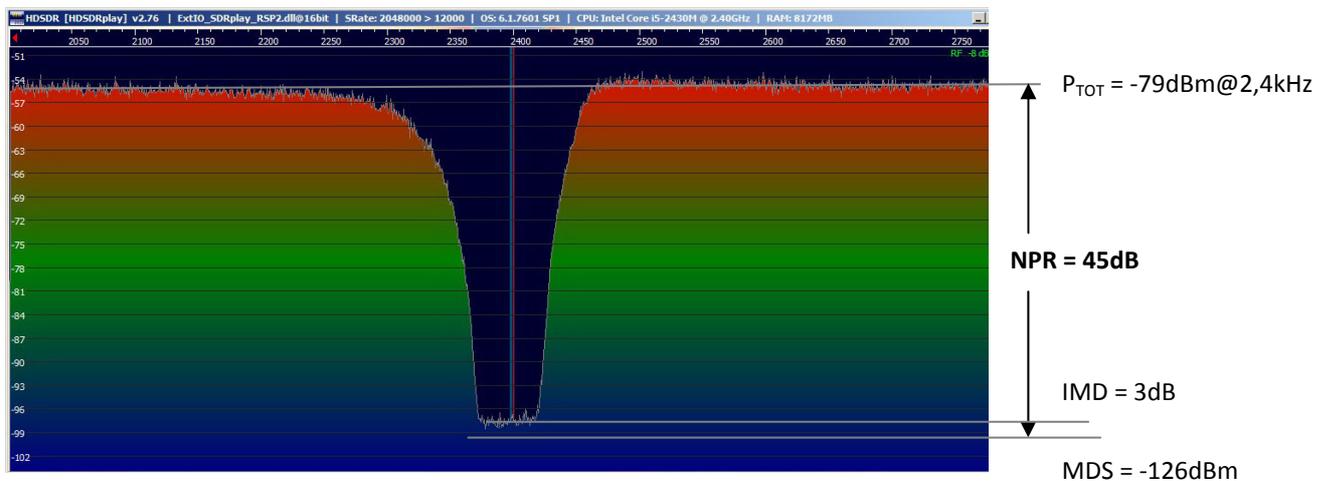


Einstellungen am RSP2: LNA On, Mixer On, Gain Reduction 68dB, Low IF

Bei einer Rauschleistung von  $-79\text{dBm}@2,4\text{kHz}$  (33dB Dämpfung), steigt der Rauschpegel am NF-Ausgang des RSP2 um 3dB an. Das gleiche Ergebnis zeigt die FFT-Analyse des Signals in **Bild 19**. Die gemessene Empfindlichkeit beträgt  $-126\text{dBm}$ .



**Bild 18:** Einstellungen am RSP2 unter SDRplay



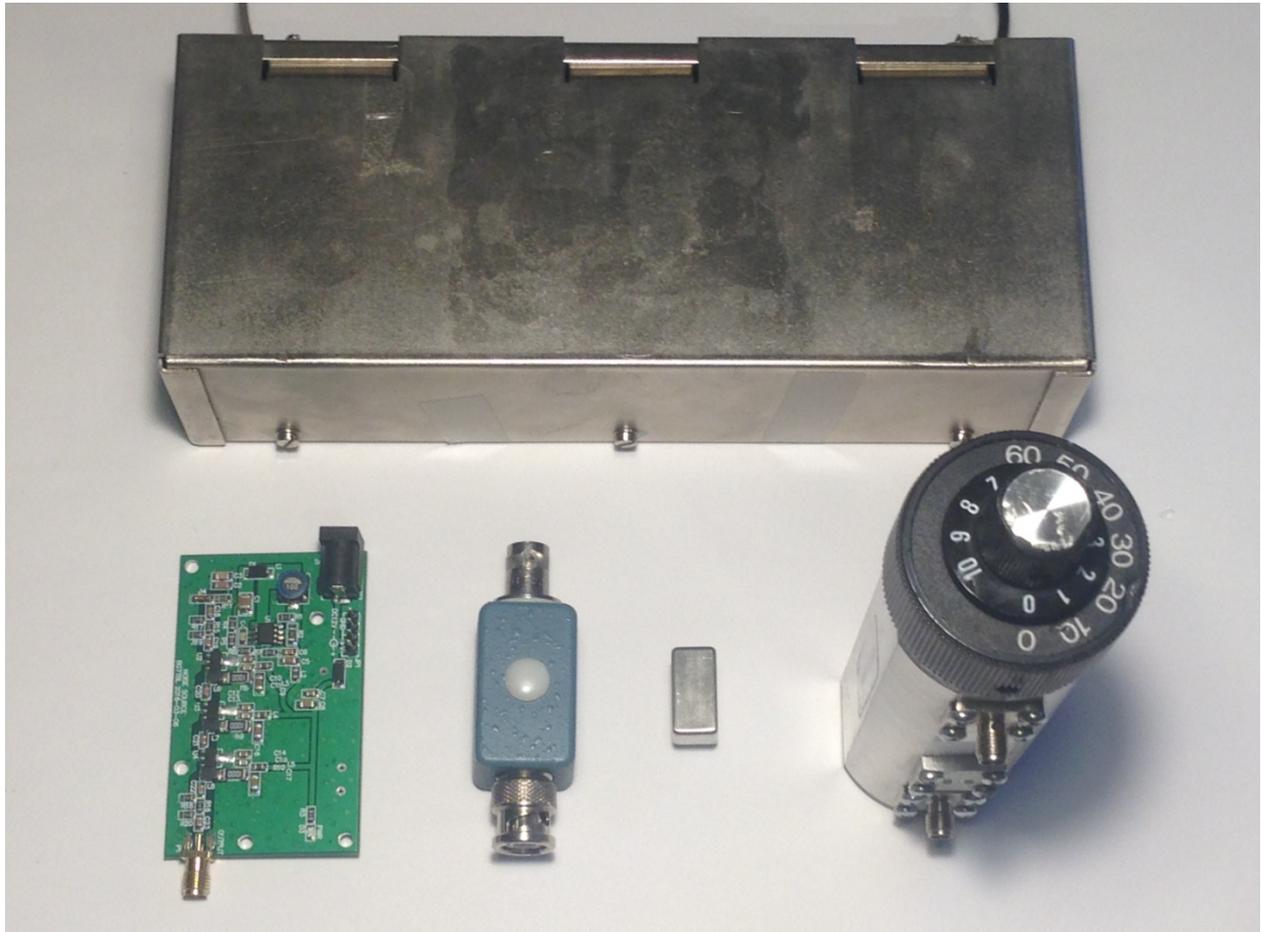
**Bild 19:** Rauschanstieg um 3dB bei  $P_{\text{Noise}} = -79\text{dBm}@2,4\text{kHz}$

Daraus berechnet sich ein NPR von

$$\mathbf{NPR = P_{TOT} - MDS = -79dBm - (-126dBm) = 46dB}$$

mit:  $P_{TOT}$  = erforderlicher Rauschpegel für einen Rauschanstieg  $S+N/N$  von 3dB

MDS = Empfindlichkeit (Noise Floor) des RSP2



**Bild 20: Verendete Teile vom NPR-Messplatz. Oben: Kerbfilter 2,4MHz (eBay), unten: Rauschgenerator (FA), Tiefpassfilter 1MHz, LP-Filter 6MHz (MCL) und stellbares Dämpfungsglied 0...70dB (eBay).**

Werner Schnorrenberg

DC4KU

11.08.2017

Rev.: 7.2019