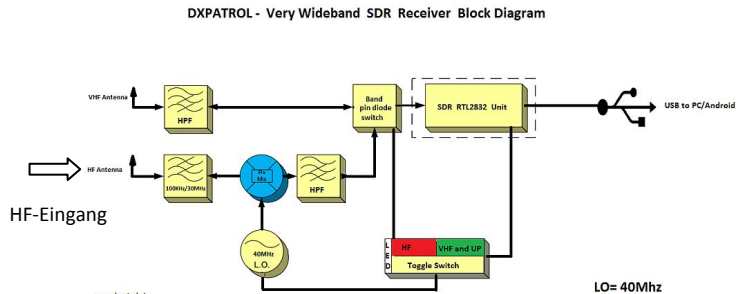


Großsignalfestigkeit eines SDR-Receiver

Messung kritischer Spezifikationen eines SDR-Receiver



DX Patrol 100kHz-2GHz



Blockschaltbild

Nachfolgend soll die **Großsignalfestigkeit** eines SDR-Receiver im **HF-Bereich (0,1-30MHz)** ermittelt werden. Der erste Test erfolgt mit gewählter RF-Gain von 0dB (min. Verstärkung) und der zweite Test mit maximaler RF-Gain von 49,6dB (max. Verstärkung).

1.) Intermodulation im 40m-Band mit "RF-Gain=0dB"

Der nutzbare Dynamikbereich eines Empfängers, wird in Richtung kleiner Signale durch das Grundrauschen und in Richtung großer Signale durch Auftreten von Intermodulationsprodukten (nichtlinearen Verzerrungen) begrenzt. In Empfängern treten hauptsächlich IM-Störungen 2.-, 3.- und 5.-Ordnung auf. Verantwortlich hierfür ist die endliche Linearität des Empfängereingangs. Den Messaufbau für IM-Messungen mit einem HF- 2-Ton-Generator zeigt Bild 1.

Verwendet werden zwei HF-Trägersignale bei $f_1=7,052\text{MHz}$ und $f_2=7,057\text{MHz}$, die mit den Pegeln 2x-20dBm, 2x-14dBm und 2x-6dBm über einen Power-Splitter in den HF-Eingang des SDR-Receiver eingespist werden.

Messaufbau

Bild 1: Messaufbau für IM3-Messung und Controller-Einstellung mit RF Gain = 0dB

Grundeinstellung DX Patrol: RF Gain=0, AGC off, RTL AGC off, Bandwidth 500Hz, Filter Order 300, FFT Display Windows Blackman-Harris, Resolution 262144Hz, Sample Rate 2,4MSPS.

Wenn die RF-Gain auf 0dB eingestellt wird, erreichen beide Spektrallinien bei einem Pegel von jeweils -20dBm die oberste, horizontale Bildschirm-Rasterlinie. Übersteigen die Spektrallinien diesen Referenzpegel um mehr als 15dB, dann besteht die Gefahr, dass sie außerhalb der linearen Übertragung des Receivers liegen und Klirrfaktor und Intermodulation erzeugen.

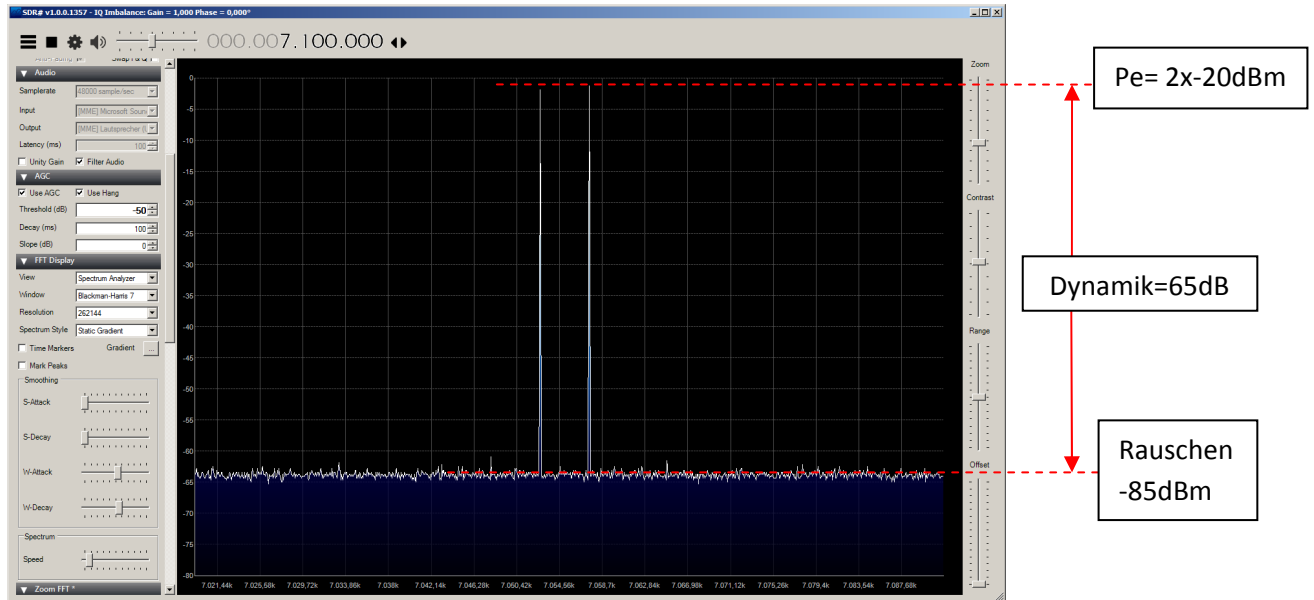


Bild 2: $P_e=2x-20dBm$, $f_1=7,052MHz$, $f_2=7,057MHz$, RF Gain=0, keine IM-Produkte erkennbar

Bei einem Pegel von $2x-14dBm$ sind schon erste, kleine IM-Produkte am Rauschsockel zu erkennen.

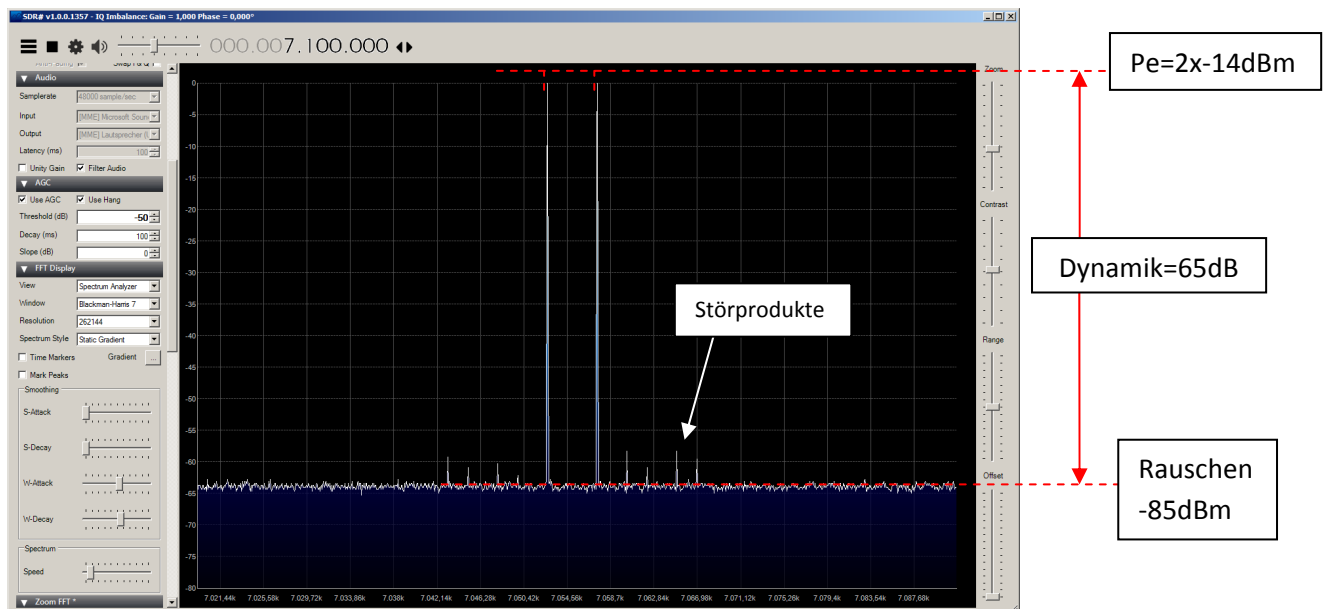


Bild 3: $P_e=2x-14dBm$, minimale IM-Produkte (und weiter Störprodukte durch Quantisierungsfehler) im Rauschen schon erkennbar, obere Linie (Referenzpegel) um 6dB übersteuert, Dynamik 65dB

Werden beide Nutzsignale auf einen Pegel von **2x -6dBm** erhöht, entstehen sichtbare Intermodulationsprodukte 3., 5. und 7. Ordnung, rechts und links von den Trägersignalen. Die stärksten Störsignale erzeugt das IM_3 -Signal, mit einem Abstand zu den Nutzprodukten von

$$\Delta IM_3 = -6dBm - (-48dBm) = 42dB$$

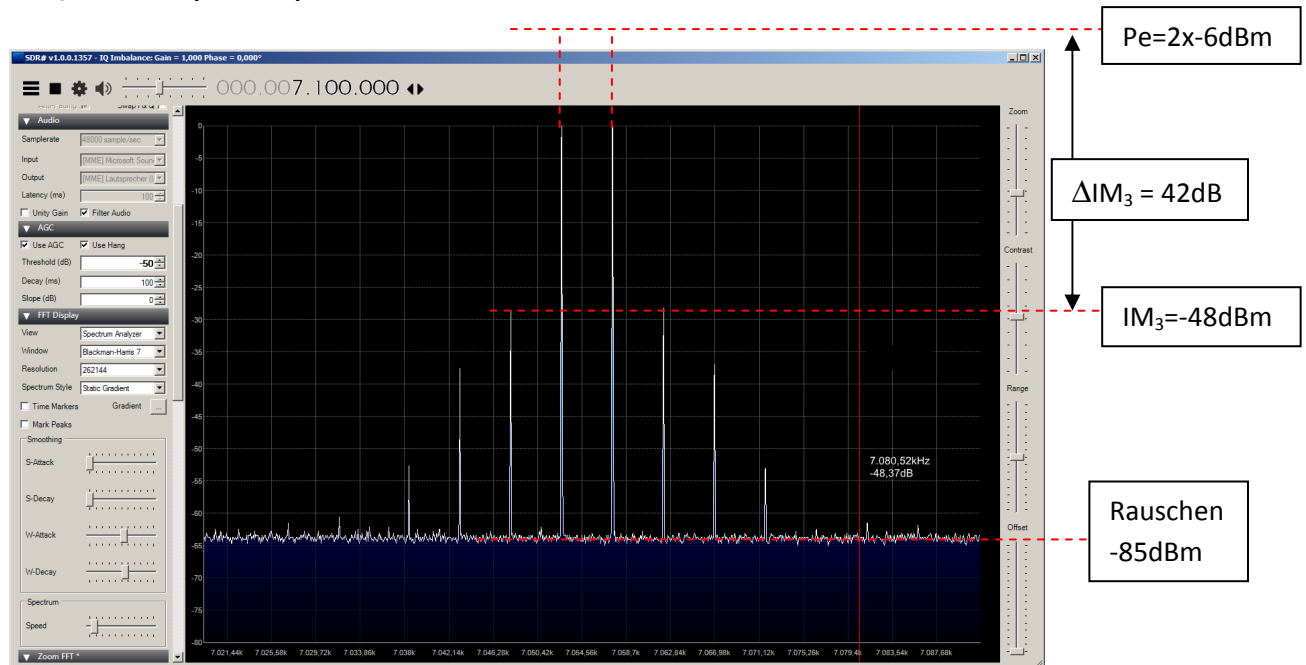


Bild 4: $P_e = 2x - 6dBm$, $f_1 = 7,052MHz$, $f_2 = 7,057MHz$, RF Gain 0dB, Dynamik 42dB. Beide Signale liegen 15dB oberhalb der obersten, horizontalen Linie und der A/D-Wandler steht kurz vor Saturation (Begrenzung).

Aus den gewonnenen Messwerten in Bild 4 berechnet sich der Intercept-Point 3. Ordnung (IP_3) zu

$$IP = \Delta IM / (N - 1) + P_e$$

$$IP = \text{Intercept-Point (IP)}$$

ΔIM = Intermodulationsabstand in dB

N = Ordnungszahl

P_e = Pegel der Eingangssignale

$$IP_3 = \Delta IM_3 / 2 + P_e = 42dB / 2 - 6dBm = +15dBm$$

IM-freier Dynamikbereich

Bild 3 zeigt den Intermodulationsfreien Dynamikbereich. Bei einem max. Pegel von $2x -20dBm$ 2-Ton Leistung sind noch keine Intermodulationsstörungen im Bildschirm erkennbar. Lt. Definition ist die obere Grenze der Aussteuerung dann erreicht, wenn die IM-Produkte die Leistung des Grundrauschens (S) erreichen. Bei einem Grundrauschen von $-85dBm$ ergibt sich demnach ein maximaler Dynamikbereich von 65dB. Der sichtbare, verzerrungsfreie Dynamikbereich beträgt demnach 65dB.

2.) Intermodulation im 40m-Band mit "RF-Gain=49,6dB"

Bei Erhöhung der "RF Gain" auf 49,6dB, steigt die Empfindlichkeit des Referenzpegels von -20dBm auf -70dBm an. Der SDR-Receiver arbeitet jetzt mit hoher Verstärkung und ein Doppeltensignal von $P_e=2x-46dBm$ verursacht bereits starke Intermodulationsstörungen (Bild 6).

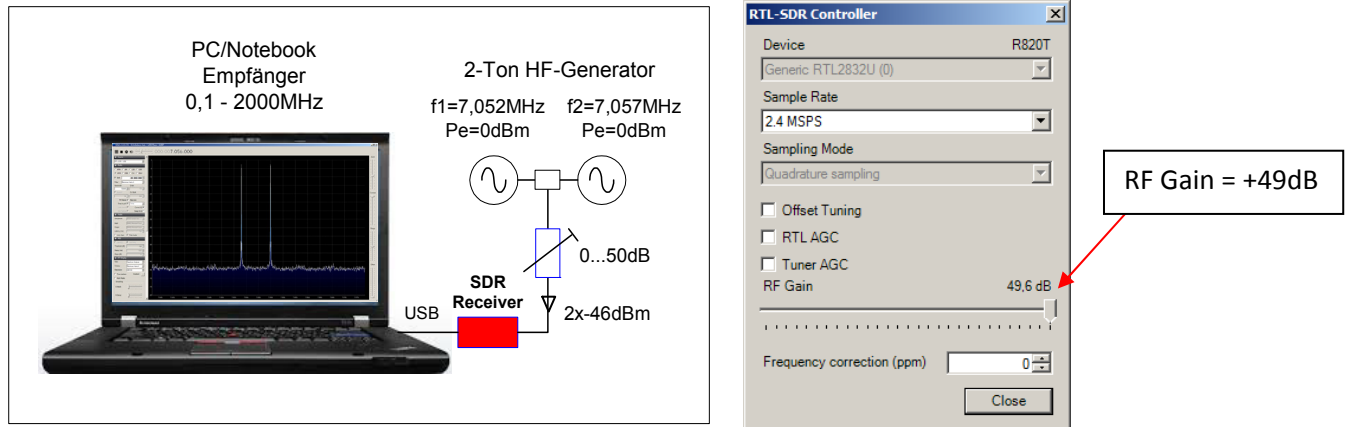


Bild 5: Messaufbau für IM3-Messung und Grundeinstellung des SDR-Controller, RF Gain = 49dB

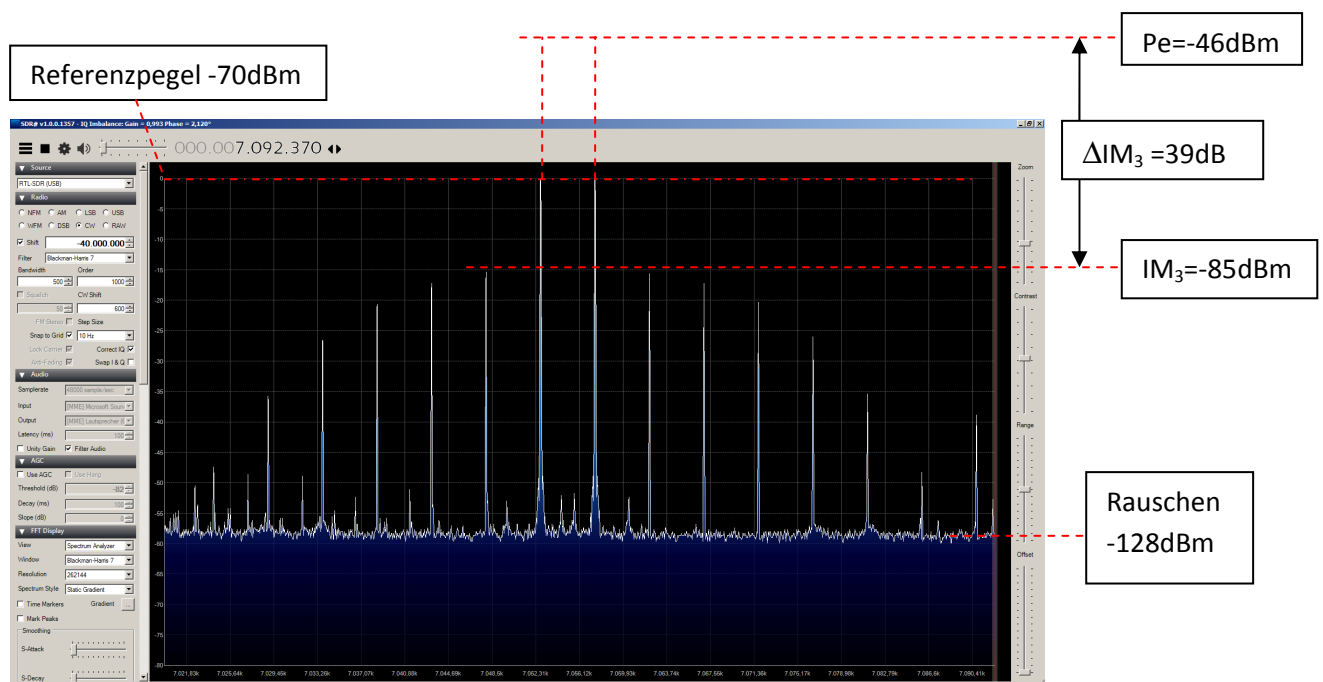


Bild 6: $P_e=2x-46dBm$, $f_1=7,052MHz$, $f_2=7,057MHz$, RF Gain=49,6dB, die Nutzprodukte liegen beide um 24dB oberhalb der oberen, horizontalen Linie, $\Delta IM_3 = 39dB$

Die stärkste Störung erzeugt das IM_3 -Signal, mit einem Abstand zu den Nutzprodukten von nur noch

$$\Delta IM_3 = -46dBm - (-85dBm) = 39dB$$

Daraus berechnet sich der Intercept-Point 3. Ordnung (IP3) des SDR-Receivers zu

$$IP_3 = \Delta IM_3 / 2 + P_e = 39dB / 2 - 46dBm = -26,5dBm$$

Zusammenfassung

Ohne HF-Vorverstärkung (RF Gain=0dB) eignet sich der SDR-Patrol gut als großsignalfester KW-Empfänger und FFT-Analysator mit einer Empfindlichkeit von ca. -85dBm und einem IP_3 von +15dBm. Mit wählbarer, maximaler Vorverstärkung von RF Gain=49,6dB, wird der verzerrungsfreie Dynamikbereich stark eingeschränkt. Schon Empfangssignale von 200µV erzeugen IM-Verzerrungen. Bei Verwendung leistungsstarker Antennen im KW-Bereich, sollte immer ein 10..20dB Dämpfungsglied vor den Eingang des SDR-Receiver geschaltet werden und die gewählte RF-Gain einen Wert von 20...30dB nicht überschreiten.

3.) Überlegungen zu IP_3 und A/D-Wandler

Der IP_3 ist ein theoretischer Schnittpunkt, bei dem sich die Übertragungskennlinien der Nutz- und IM_3 -Störsignale kreuzen (Bild 7a). Mit Hilfe des IP_3 kann die Aussteuergrenze (P_{max}) eines 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 ermittelte IP_3 nicht mehr zur Berechnungen von Aussteuergrenze und Dynamik herangezogen werden und führt beim Vergleich mit analogen Konzepten zu falschen Ergebnissen. Die entstehenden IM-Produkte von A/D-Wandlern folgen nicht mehr den definierten Gesetzmäßigkeiten des quadratischen (IP_2) oder kubischen (IP_3) Anstiegs. Vielmehr spielt der Intermodulationsabstand eine wesentliche Rolle, da er im Gegensatz zu Analoggeräten durch Pegeländerungen kaum beeinflusst wird, aber stark abhängig ist vom augenblicklich zu verarbeiteten Signalgemisch.

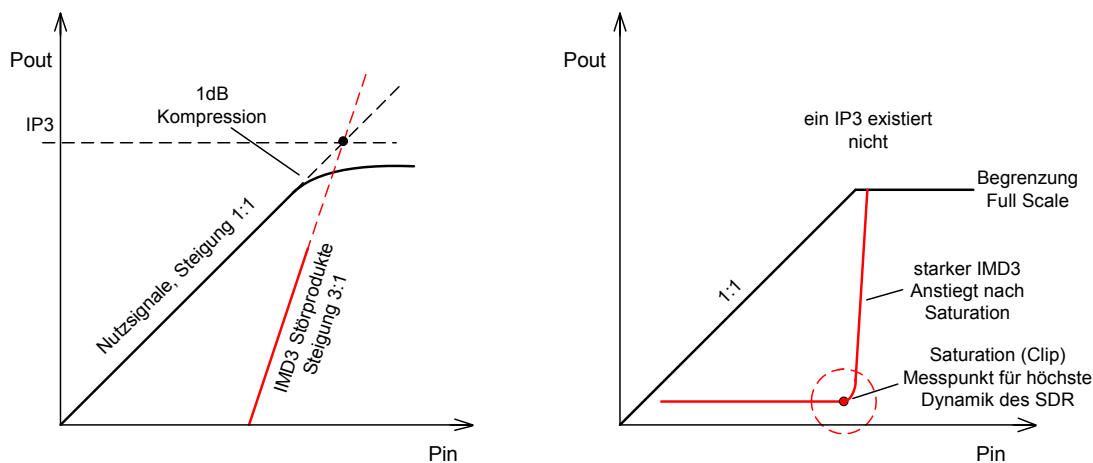


Bild 7: a) IM_3 bei analogen Empfängern

b) IM_3 bei Empfängern mit ADC im Eingang

Im Testaufbau werden zwei HF-Signale mit gleichem Pegel auf den Eingang des SDR gegeben. Ab einer bestimmten Pegelgröße und abhängig von der eingestellten Verstärkung des SDR, tauchen die ersten IM_3 -Produkte im Grundrauschens auf, ähnlich wie bei analogen Empfängern. Bei Signalerhöhung, steigen die IM_3 -Produkte jedoch nicht schneller an als die Nutzprodukte, sondern verbleiben bei ihrem Pegel. Manchmal sinken die IM_3 -Produkte sogar bei wachsenden Nutzsignalen. Würde man jetzt den IP_3 nach der Formel $IP = \Delta IM/2 + P_e$ berechnen, wäre das Ergebnis für jeden Pegel anders, weil es keinen gültigen mathematischen Zusammenhang mehr gibt. Die entstehende Messkurve erlaubt es demnach nicht, den IP_3 daraus zu bestimmen, aber der IM_3 -freie Dynamikbereich kann daraus ermittelt werden. Die flache Steigung der Kurve zeigt, dass die IM_3 -Produkte nicht von den analogen Komponenten (LNA, Filter) herrühren, sondern vom ADC selbst. Das Spektrum zeigt keine Intermodulationsprodukte aber

Störsignale des ADC, die durch Quantisierungsfehler bei der Digitalisierung und den nachfolgenden Rechenoperationen auftreten. Mit Hilfe von "Dithering" können diese Fehler etwas gemindert werden, indem ein zusätzliches Rauschsignal in den ADC eingespeist wird, wodurch die Störprodukte abdeckt werden.

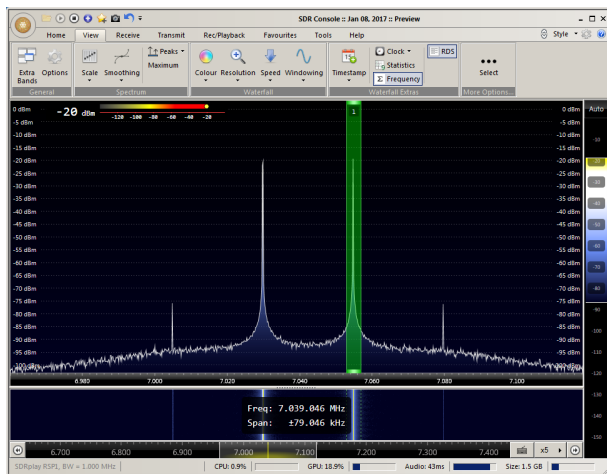
Der ADC ist ein nichtlineares Bauteil, dessen Linearität sich prinzipiell nicht über den IP3 bestimmen lässt, weil die IM-Produkte bei Signalvergrößerung nicht mehr kubisch ansteigen. Erst einige dB vor Saturation, bevor das Signal begrenzt, wachsen die IP3-Produkte sehr viel schneller an, als die Nutzsignale. Vor dieser Stelle können auch analoge Baugruppen, wie ein vorgeschalteter LNA, für eine IMD3-Zunahme 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 einen Wert von +30...40dBm erreichen kann. Der IP3 ist zwar für diesen Punkt korrekt, für alle anderen Pegel ist er jedoch nicht mehr gültig!

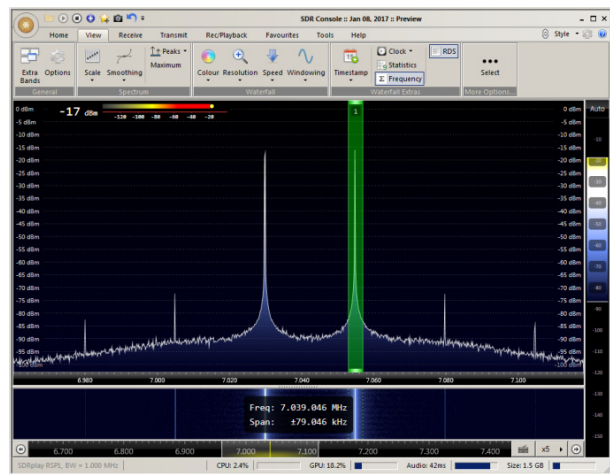
Ergebnisse von IP3-Messungen an einem SDRplay-RDS1

Nachfolgende Bilder zeigen die unterschiedlichen IP3-Werte am Beispiel des SDRplay, in Abhängigkeit der Größe der Eingangssignale. Bei f1=7,030 und f2=7,055MHz werden die Nutzsignale ausgehend von 2x-20dBm in 3dB Stufen bis auf 2x-9dBm erhöht.

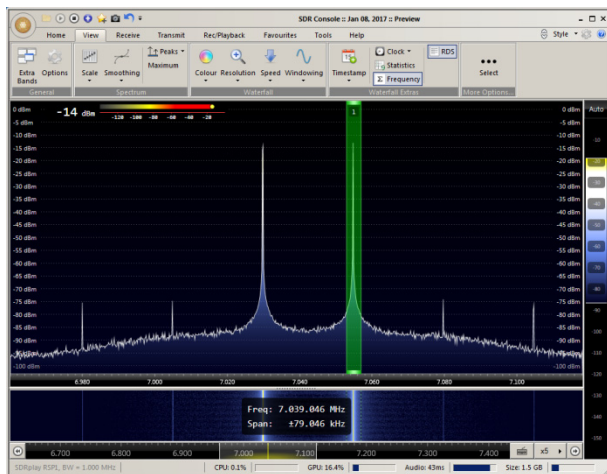
- Grundeinstellung am SDRplay: Gain Reduction maximal, LNA=Off.
- Unter SDR-Console: Referenzpegel auf 0dBm (1mW)einstellen (oberste horizontale Rasterlinie).



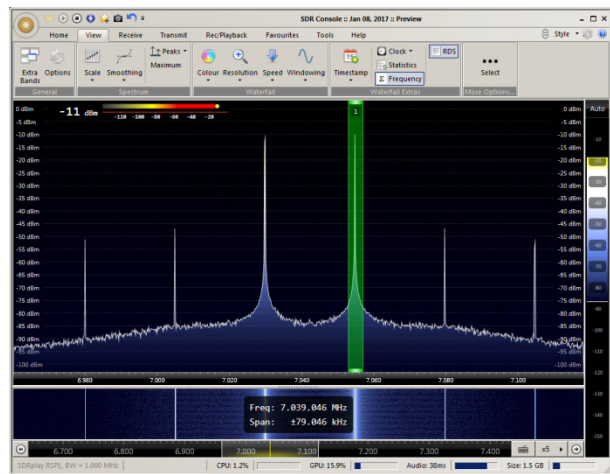
Pe=2x-20dBm, ΔIM3=56dB, IP3=8dBm



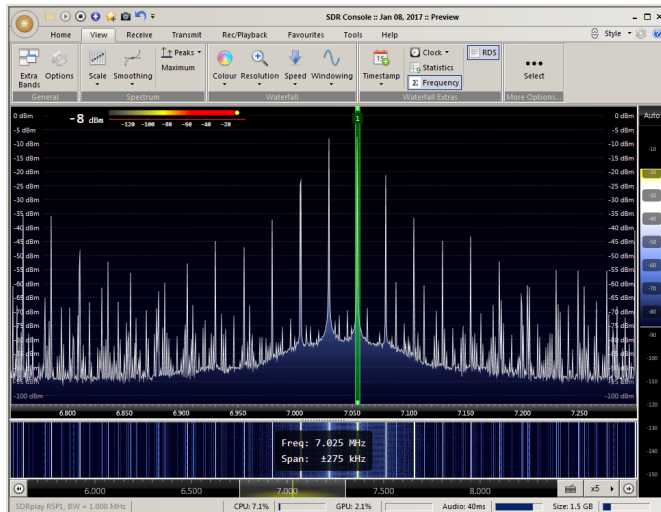
Pe=2x-17dBm, ΔIM3=55dB, IP3=11dBm



Pe=2x-14dBm, ΔIM3=62dB, IP3=17dBm!



Pe=2x-11dBm, ΔIM3=36dB, IP3=7dBm



Pe=2x-8dBm, Δ IM3 =16dB, IP3=0dBm (Begrenzung)

Deutlich zu erkennen ist, dass die IM3-Produkte bei Erhöhung der Signalpegel von 2x-17dBm auf 2x-14dBm nicht ansteigen sondern fallen! Bei Pe=2x-14dBm liegen die Nutzsingale schon kurz unterhalb der Saturation und bei dieser Aussteuerung erreicht der RDS auch seine größte Dynamik und seinen maximalen IP3 von +17dBm. Bei Pe=2x-8dBm fährt die ADC in Begrenzung und die Verzerrungsprodukte werden sehr groß.

Tabelle der Ergebnisse:

Pe	Δ IM3	IP3
-20dBm	56dB	8dBm
-17dBm	55dB	11dBm
-14dBm	62dB	17dBm
-11dBm	36dB	7dBm
-8dBm	19dB	0dBm

bestes IP3-Ergebnis!

Trotz der beschriebenen Problematik, wird der IP3 von ADC's und SDR's in Datenblättern meist mit angegeben, obwohl er für weitere Berechnungen (Rückrechnungen auf Dynamik und Pemax) nicht nutzbar ist.

Literatur

(1) Antennenrauschen im Kurzwellenbereich

https://dc4ku.darc.de/Antennenrauschen_im_Kurzwellenbereich.pdf

(2) Empfindlichkeit und Rauschzahl eines SDR-Receivers

https://dc4ku.darc.de/Empfindlichkeit_und_Rauschmass_eines_SDR-Receivers.pdf

(3) HF-Doppelton-Generator für IM3-Messungen an SSB-Endstufen und SSB-Empfängern

<https://dc4ku.darc.de/HF-Doppelton-Generator.pdf>

(4) Intermodulationsmessung an HF-Sendern und HF-Endstufen

https://dc4ku.darc.de/Intermodulationsmessung_an_HF-Sendern.pdf

(5) HF-Power-Splitter und -Combiner

https://dc4ku.darc.de/Power_Splitter.pdf

Werner Schnorrenberg
DC4KU, dc4ku@darc.de
15.10.2015

Rev. 10.11.2015, 12.02.2017, 07.2019