Sender-Messungen am IC-7300

Die Linearität von SSB-Sendern ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal. Hierbei interessiert den Anwender insbesondere, wie groß der Pegelabstand zwischen den Nutzsignalen und den Störsignalen (IM, Oberwellen, etc.) des Senders bei seiner maximal zulässigen Aussteuerung ist. Je höher der Abstand zwischen den Nutz- und Störprodukten ist, umso besser ist die Qualität des Senders. Nachfolgend wird die Messung der Intermodulation (IM) und des kumulativen Seitenbandrauschens (TX-SBN) an einem IC-7300 näher beschrieben werden.

Aussteuerung des Senders mit einem 1-Ton-Signal

Den Aufbau zur HF-Leistungsmessung am IC-7300 zeigt **Bild 1**. Als Signalquelle wird ein NF-Signal-Generator **(1)** verwendet, der mit einer Ausgangsspannung von ca. 10mVss mit dem Mikrofon-Eingang des IC-7300 verbunden ist. Der IC-7300 arbeitet in den Grundeinstellungen von f=7,1MHZ, B=2,4kHz und USB. Dem HF-Ausgang folgt ein Wattmeter und ein 100W-Lastwidertand mit -40dB Auskopplung, der mit einem Spektrumanalysator und/oder Oszilloskop verbunden ist. Der hochohmige Eingang des Scopes muss hierbei mit einem 50 Ohm-Widerstand abgeschlossen werden, ansonsten werden die Messergebnisse im Zeitbereich falsch.

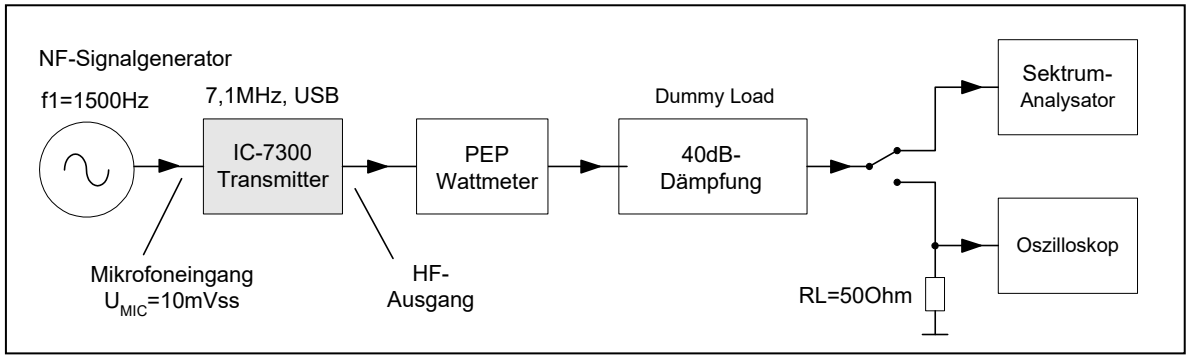

Bild 1: Transmitter Leistungsmessung mit einem 1-Ton Signal

Nach Start des Senders, das „AUDIO“ Menü am IC-7300 öffnen. Das Audio-Display zeigt dann das eingespeiste NF-Signal von 1.5kHz im Zeit- und Frequenzbereich an, als auch im HF-Bereich als Spektrallinie bei 7100kHz - 1,5kHz (USB) = 7098,5kHz **(Bild 2, links)**. Anschließend auf den Drehknopf „MULTI“ drücken worauf sich ein weiteres Display öffnet, in dem die momentan gewählte MIC GAIN (Mikrofon-Verstärkung) in % anzeigt wird. Hier den Pegel - ausgehend von 0% - in Schritten soweit erhöhen, bis die Leistung am Wattmeter genau P = 100W **(Bild2, rechts)** erreicht, bei mir erfolgte das z.B. bei einer MIC GAIN von 50%.

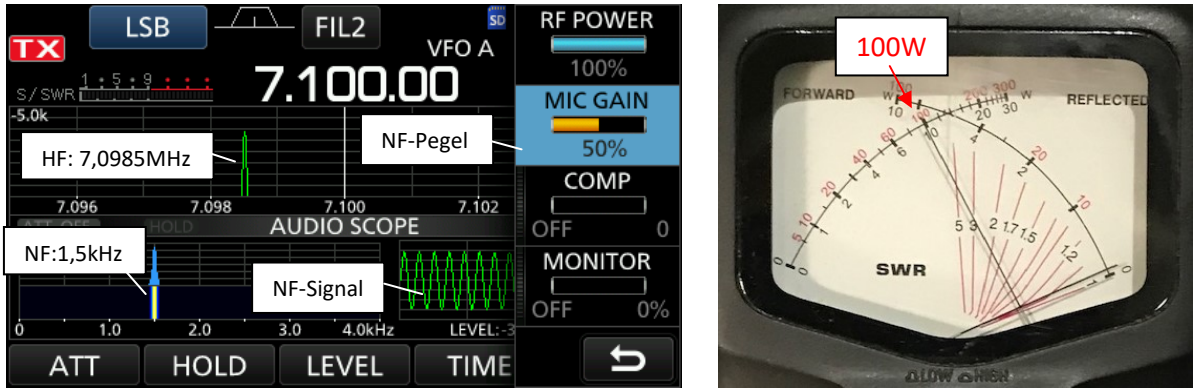

Bild 2: AUDIO SCOPE und MULTI aktiviert (links) und Wattmeter mit 100Watt Ausgangsleistung (rechts)

Hinweis zur NF-Regelung: Vergrößert man das eingespeiste NF-Signal oder die MIC GAIN weiter bis auf 100% vergrößert das die HF-Ausgangsleistung des Senders jedoch nicht. Stattdessen regelt der IC-

7300 die Modulation automatisch so weit zurück, dass keine Übersteuerung stattfinden kann. Die maximale produzierte Leistung des IC-7300 beträgt stets 100Watt.
Am Ausgang des Senders zeigt das Oszilloskop **(Bild 3, links)** jetzt eine Spannung von Uss = 2Vss an. Bezogen auf 40dB Dämpfung beträgt die Spannung 2Vss + 40dB = 200Vss entsprechend einer effektive Spannung U_{eff} = $U_{ss}/2 \times \sqrt{2}$ = $70{,}7V_{eff}$ und einer daraus resultierenden Leistung von P = U_{eff}^2/R = $70{,}7^2V/50Ohm$ = 100W.
Der Spektrumanalysator zeigt eine Spektrallinie bei f = 7MHz-1,5kHz = 7,098500MHz (USB) mit einem Pegel von +9,93dBm **(Bild 3, rechts)**. Addiert man die 40dB Dämpfung hinzu, beträgt die Ausgangsleistung 49,93dBm, entsprechend einer Leistung von P = 98,4 Watt. Bezeichnung wie PEP und AVR (Average) gibt es bei einer 1-Ton-Aussteuerung nicht. Es gilt: P = PEP = AVR = 100W.

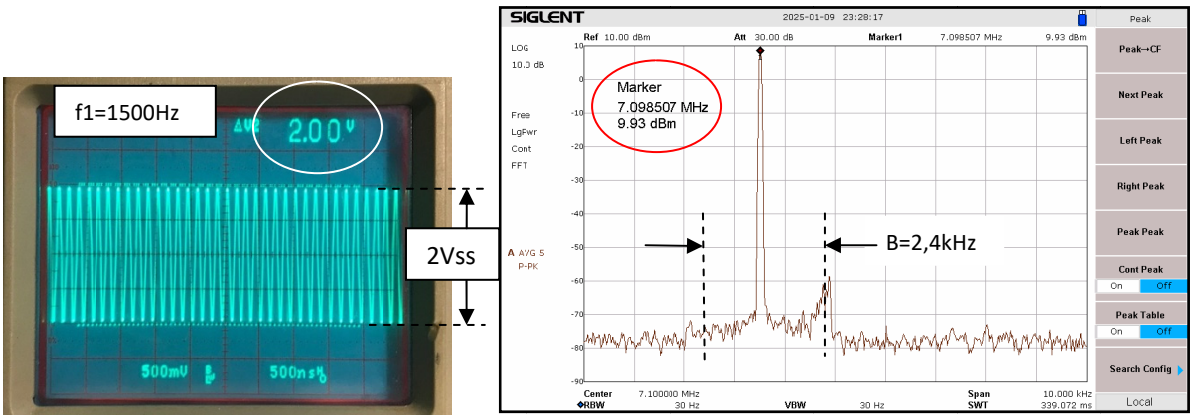

Bild 3: HF-Signal am Scope (links) und Spektrumanalysator (rechts)

Aussteuerung des Senders mit einem 2-Ton-Signal

Bei Modulation mit zwei Tönen **(1)** sehen die Ergebnisse etwas anders aus. Neben dem 1500Hz-Signal wird noch ein weiteres NF-Signal bei 1300Hz mit exakt gleichem Pegel eingespeist **(Bild 4)**. Durch die Addition der Sinussignale entsteht ein „Schwebungssignal“, bei der sich die Amplituden im Abstand von 5mS (Delta f = 200Hz) addieren bzw. auslöschen **(Bild 5)**. Im Schwebungsmaximum entsteht die doppelte Amplitude eines Einzelsignals und gemäß $P = U^2/R$ die vierfache Leistung. Der IC-7300 liefert in den Spitzen des Schwebungssignals jedoch keine 400W Leistung (obwohl er das rein rechnerisch tun müsste) weil die zuvor beschriebene automatische NF-Regelung im Modulator einsetzt und die HF-Spitzenleistung automatisch auf max. 100W (PEP) begrenzt.

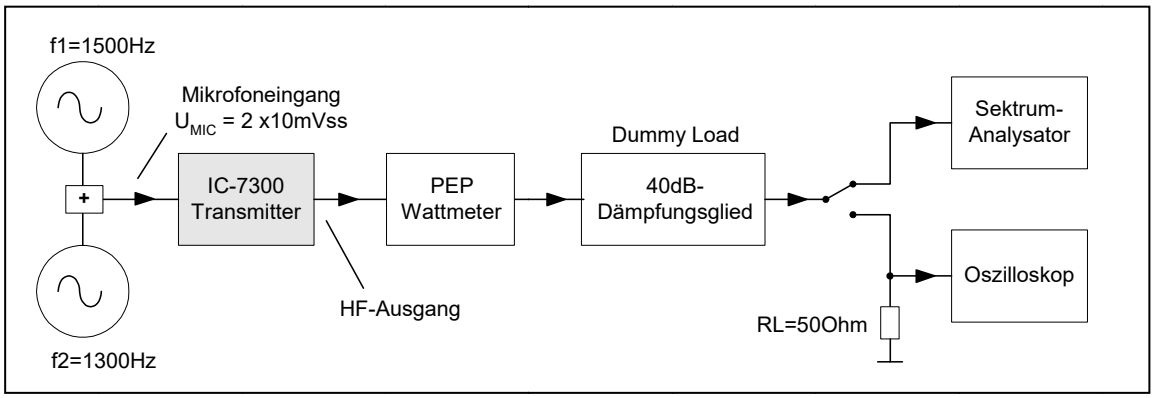

Bild 4: Transmitter Leistungsmessung mit einem 2-Ton Signal

Im AUDIO SCOPE-Display **(Bild 6)** des IC-7300 ist das NF-Schwebungssignal ebenfalls erkennbar. Wer genau hinschaut erkennt, dass die Amplitude der Spannung im Schwebungsmaximum exakt die gleiche ist wie die des 1-Ton Signal in **Bild 2**. Die Regelung des HF-Signals funktioniert also. Selbst wenn man die Amplitude beider Signale weiter vergrößern würde, ändert sich die max. Amplitude des Schwebungssignals (Summensignal) nicht.

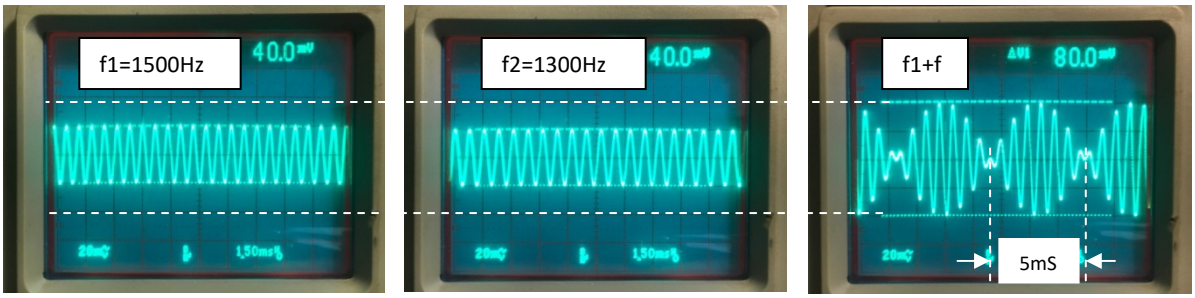

Bild 5: f1, f2 und das Ergebnis von f1+f2

Auf den ersten Blick erscheint die Anzeige des Wattmeters etwas irritierend, denn es zeigt nur 50W an obwohl der Sender in den Spitzen mit 100W arbeitet. Das liegt daran, dass mein Wattmeter (Zeigerinstrument) keinen Spitzenwert anzeigen kann, sondern nur die mittlere Leistung (Average-Power) und diese beträgt 50Watt.



Bild 6: NF 2-Ton Signal am Eingang und resultierende HF-Ausgangsleistung von 50Watt

Die HF-Spannung am Ausgang des 40dB-Dämpfungsglieds **(Bild 7)** beträgt in den Spitzen $2V_{ss}$, woraus sich eine effektive Spannung von $U_{eff} = 2V_{ss} \times 100/2 \times \sqrt{2} = 70{,}7V$ ergibt, entsprechend einer Spitzenleistung (PEP) von $P = Ueff^2/R = 70{,}7V^2/50Ohm = 100Watt$.

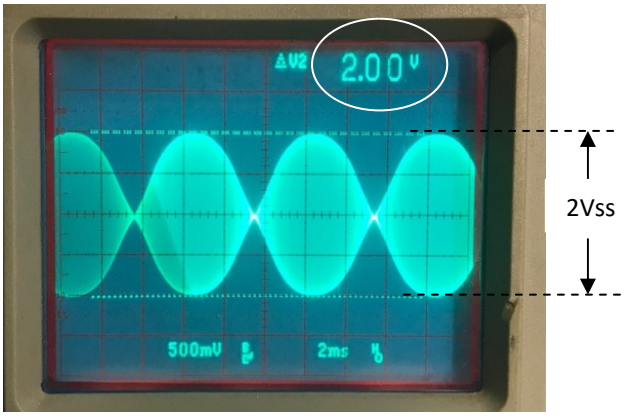

Bild 7: HF-Signal am Scope, Delta f = 200Hz

Der Spektrum Analysator **(Bild 8)** zeigt hingegen die mittlere Leistung des HF 2-Ton Signals an, sowie dessen Intermodulationsprodukte 3. Ordnung rechts und links der Trägersignale. Die Pegel beider Nutzsignale betragen +4dBm + 40dB Dämpfung = +44dBm = 25W, woraus sich eine kumulative Leistung von AVR (Average) = 25W + 25W = 50W ergibt. Die PEP-Leistung des Senders beträgt hingegen +10dBm + 40dB Dämpfung = +50dBm = 100W und liegt im Spektrum um +6dB oberhalb der mittleren Leistung.

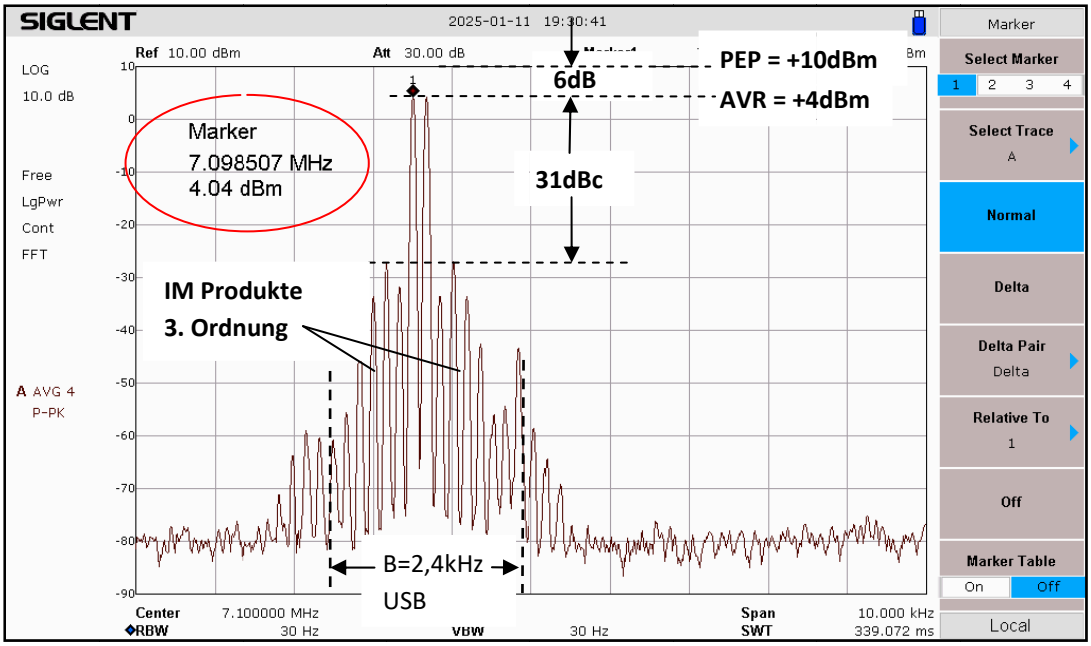

Bild 8: Inband-Intermodulation

Leistungsbilanz des HF 2-Ton Signals:

Maximale Leistung, PEP

$$\mathrm{PEP} = \frac{(\mathrm{Uss}/2)^2}{2 * \mathrm{RL}} = \frac{(200\mathrm{V}/2)^2}{100\Omega} = \frac{5000\mathrm{V}}{100\Omega} = 100\ \mathrm{Watt}$$

Mittlere Leistung, $P_{Average}$

$$P_{AVR} = P = \frac{(\mathrm{Uss}/4)^2}{\mathrm{RL}} = \frac{(200\mathrm{V}/4)^2}{50\Omega} = 50\ \mathrm{Watt}$$

Leistung der Einzelsignale

$$P_{\mathrm{Einzelsignal}} = \frac{(\mathrm{Uss}/4)^2}{2 * \mathrm{RL}} = \frac{(200\mathrm{V}/4)^2}{100\Omega} = 25\ \mathrm{Watt}$$

Die PEP-Leistung beträgt 100Watt und die mittlere Leistung nur 50% der Spitzenleistung, nämlich 2 x 25Watt der Einzelsignale.

Inband-Intermodulation

Das Spektrum in **Bild 8** bezeichnet man auch als „Inband-Intermodulation“ weil sich aufgrund des geringen Frequenzabstands der Nutzsignale von nur 200Hz fast alle IM-Produkte innerhalb der Bandbreite des Auflösungsfilter von 300Hz bis 2700Hz befinden. Der Abstand des größten IMD3-Produktes zu beiden Nutzsignalen beträgt 31dBc bzw. 37dBc bezogen auf PEP. Erfolgt die Modulation über ein Sprachsignal, entsteht aufgrund der Intermodulation ein NF-Klirrfaktor von 2,8% in den Spitzen bzw. 1,4% bezogen auf AVR und die Modulation hört sich demnach noch klar und deutlich an. Würde der IM-Abstand nur 20dBc betragen (bei vielen Sendern ist das leider der Fall), erhöht sich der Klirrfaktor des demodulierten Signals auf 10% und die Sprache würde sich schon etwas hart und verzerrt anhören. Wird das Sprachsignal über *Multi -> COMP* zusätzlich komprimiert, dann werden auch leise Töne mit mehr Intensität übertragen und die mittlere Übertragungsleistung (AVR) dadurch erhöht. Die IM des HF-Signals vergrößert sich dadurch aber nicht.

Außerband-Intermodulation

Noch wichtiger ist die Ermittlung der Außerband-Intermodulation, weil sich erst dann zeigt, ob das Sendesignal in den Nachbarkanälen Störungen verursacht. Hierzu wird das Delta f der Signaltöne auf 1kHz vergrößert (f1=800Hz, 2=1800Hz, B=2,4kHz), so dass die IM-Produkte auch in den Nachbarkanälen sichtbar werden **(2)**. **Bild 9** zeigt das Ergebnis der Messung bei Vergrößerung des Spans auf 30kHz. Der IM-Abstand zum größten IM-Produkt (IMD5) im ersten Nachbarkanal beträgt wieder 31dBc und im zweiten Nachbarkanal (IMD9) 48dBc. Nun stellt sich die Frage, ob in den Nachbarkanälen eines Empfängers dadurch Störungen auftauchen oder nicht.
Beispiel: Wird das 2-Ton Signal von einem SSB-Empfänger mit z.B. S9 (-73dBm) empfangen, beträgt die max. Störung im ersten Nachbarkanal S9 - 31dB = -104dBm entsprechend S4. Falls das Grundrauschen des verwendeten Empfängers im 40m-Band S4 beträgt, wird er noch nicht gestört. Ist sein Grundrauschen jedoch kleiner als S4, wird er durch ein geringes Splattern im Nachbarkanal gestört. Im zweiten Nachbarkanal ist der IM-Abstand bereits >48dB und IM-Störsignale sind nicht mehr zu empfangen.

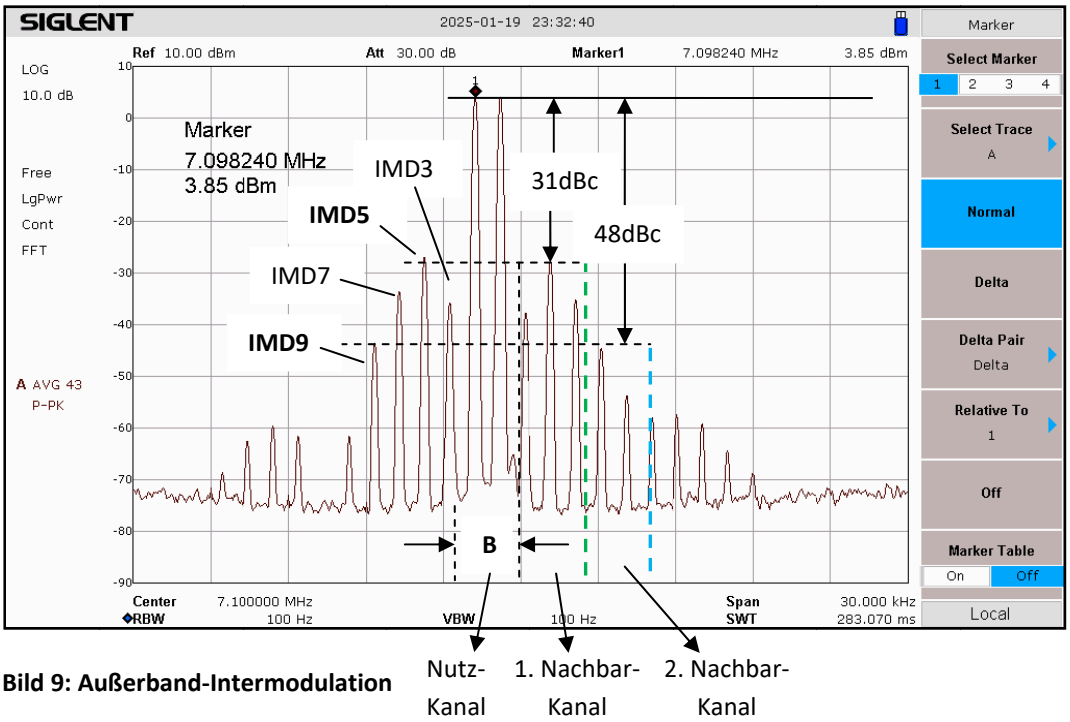

Bild 9: Außerband-Intermodulation

Nach Reduzierung der HF-Ausgangsleistung unter *MENÜ -> RF-Power* auf 50 Watt, verändern sich die Abstände der IM-Produkte leider nur geringfügig.

IM-Messung mit weißem Rauschen

Einfacher und genauer lässt sich die Intermodulation von HF-Sendern und HF-Endstufen mit weißem

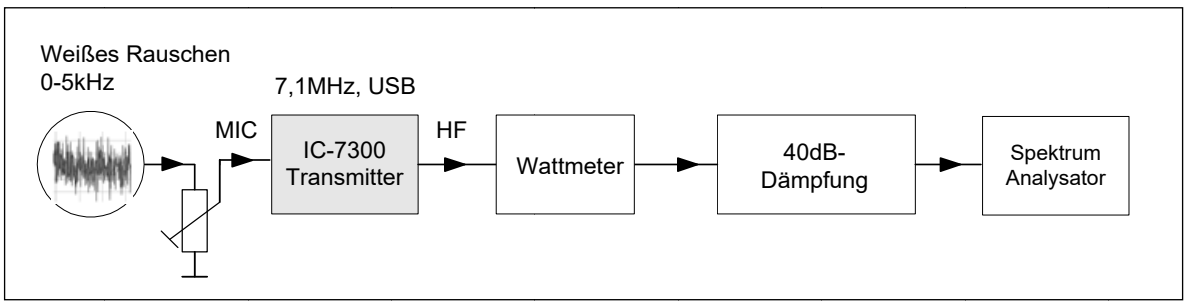

Bild 10: IM-Messung mit Rauschen

Rauschen messen. Alles was man dafür benötigt, ist ein NF-Rauschgenerator (0….10kHz) und ein Spektrum Analysator. Das Problem bei einer 2-Ton Messung ist, das keiner weiß was sich zwischen den Tönen befindet. Verwendet man anstelle des 2-Ton Signals ein weißes Rauschsignal ist es so, als würde man tausende Sinussignale verwenden und im Ergebnis entstehen dadurch keine Frequenz-lücken mehr. Als NF-Rauschgenerator verwende ich den Arbitrary Waveform Generator STG6022X oder als einfache Lösung den VELLMANN Bausatz P4301 **(3)**. Da dessen Ausgangsspannung 500mV beträgt, muss sie zunächst über ein Poti **(Bild 10)** auf ca. 20mV reduziert werden, so dass der MIC-Eingang des IC-7300 nicht übersteuert wird. Das Ergebnis der Rauschmessung zeigt **Bild 11**.

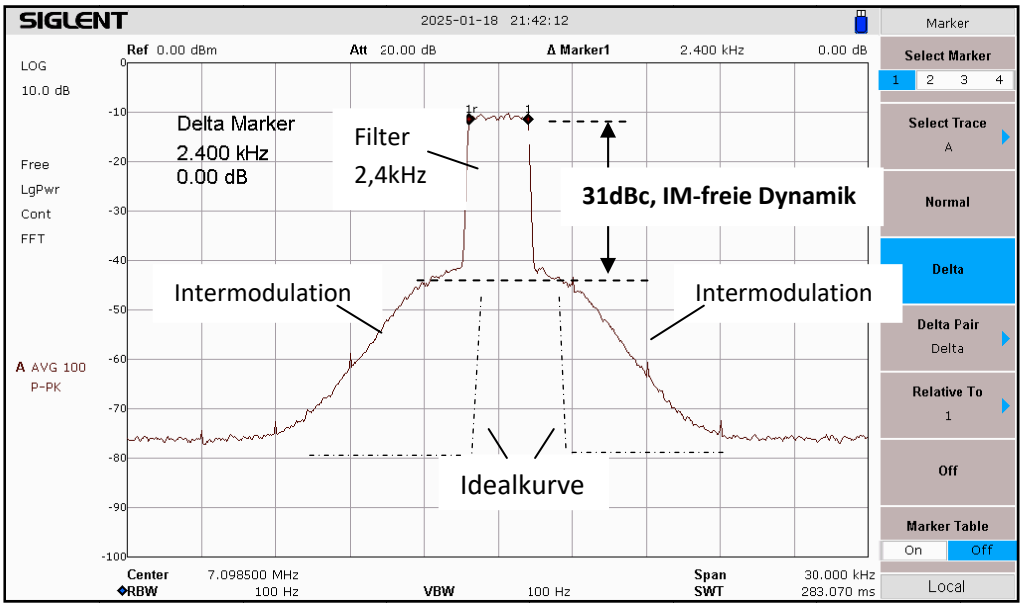

Bild 11: Ermittlung der produzierten Intermodulation des IC-7300-Senders mit Rauschen

Erst jetzt wird der gesamte IM-Verlauf des Senders lückenlos dargestellt. Dem Rauschsignal bleibt eben nichts verborgen. Der IM-Verlauf des IC-7300 ist für einen Transceiver dieser Klasse typisch und kann als zufriedenstellend beurteilt werden. Die stärkste IM entsteht in die ersten beiden Nachbar-kanälen und fällt dann relativ schnell ab. Optimal wäre es, wenn die ersten IM-Produkte einen Abstand von >40dBc hätten, das erreichen leider aber nur wenige 100W-SSB-Sender.

Sender-Seitenbandrauschen (TX-SBN)

Ein weiteres, unangenehmes Störprodukt erzeugt der Sender in Form von TX-Seitenbandrauschen, bestehend aus AM+FM-Rauschen (kumulatives Rauschen), welches in der Regel höher ausfällt als das Seitenbandrauschen des Empfängers.

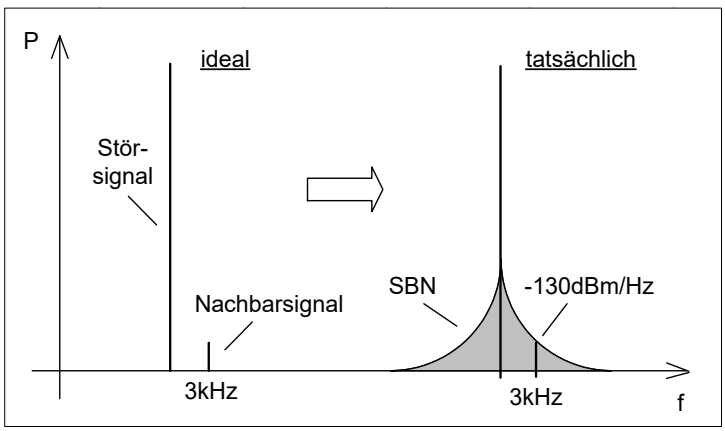

Bild 12: TX-Seitenbandrauschen eines Senders mit Abdeckung eines kleinen, benachbarten Signals

Idealerweise erzeugt ein CW-Sendesignal (Träger) nur eine schlanke Spektrallinie bis herunter ins Rauschen **(Bild 12)**. Tatsächlich erzeugt es im Sockel jedoch Seitenbandrauschen, welches so groß sein kann, dass benachbarte, kleine Empfangssignale damit zugerauscht werden **(4)**. Ein Empfänger, der sich in der Nähe das Senders befindet, verliert beim versuchten Empfang des kleinen Signals an Empfindlichkeit und somit an Dynamik. Diese Art von Desensibilisierung eines Empfängers kann nicht verhindert werden, es sei denn, der störende Sender reduziert seine Ausgangsleistung oder wechselt das Band. Das Problem mit einem rauschenden Sender, der den Empfang kleiner Signale von benachbarten Stationen unmöglich macht, ist von FieldDays und Contests bekannt.

Ein praktisches Beispiel soll zeigen, was hier passieren kann. Ein IC-7300 erzeugt ein Sender-Seitenbandrauschen (TX-SBN) von -129dBm/Hz im Abstand von +/-3kHz zum Träger. Bei einer Ausgangsleistung von 100W entsteht ein kumulative Seitenbandrauschen von P_{Noise} = -129dBm/Hz + 10log 2400Hz + 10log (100W/1mW) = -45dBm/2,4kHz welches zusammen mit dem Nutzsignal von der Antenne abgestrahlt wird **(Bild 13)**.
Empfängt ein benachbarter Funkamateur das Signal mit einem Pegel von z.B. S9+20dB (-53dBm), erzeugt das übertragene SBN im Nachbarkanal bei +/- 3kHz einen Rauschpegel von P_{Noise} = -53dBm/2,7kHz - 45dBm = -98dBm/2,4kHz. Beträgt die Empfindlichkeit des Empfängers mit angeschlossener Antenne z.B. -105dBm/2,4kHz, dann ist das empfangene, störende SBN um -98dBm - (-105 dBm) = 7dB größer als das Grundrauschen des Empfängers und ein kleines Empfangssignal wird dadurch bereits gestört oder abgedeckt.
Hersteller haben das Problem erkannt und moderne KW-Transceiver, wie z.B. der FTDX101, verfügen über ein geringes TX-SBN von -150dBc/Hz in 2kHz Abstand zum Träger und stören damit benachbarte Stationen nicht.

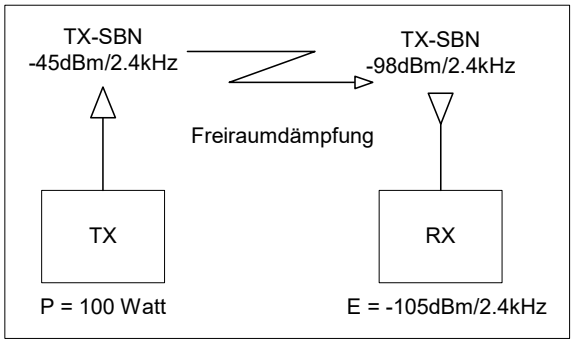

Bild 13: Beeinflussung eines Empfängers durch TX-SBN

Werner Schnorrenberg
DC4KU
14.05.2025, Rev. 11.2026

Literatur:

(1) **Die Wien-Robinson-Brücke, NF 2-Ton NF-Generator**
CQ-DL 1/2-2029, DC4KU

(2) **Selbstbau TRX, PA-Intermodulation**
https://dl6gl.de/selbstbau-trx/3-der-tx-signalpfad/3-9-intermodulationsmessungen.html
DL6GL

(3) **NF-Rauschgenerator**
VELLMAN Bausatz P4301

(4) **Sender-Seitenbandrauschen (TX-SBN)**
Funkamateur 9-2021, DC4KU
https://Transmitter-Sideband-Noise_DC4KU.pdf