

IM3-Festigkeit eines HF 2-Tongenerators

HF-Zweitongeneratoren benötigt man für Intermodulationsmessungen an Empfängern und HF-Verstärkern (Vierpolen). Als Signalquellen können Messsender oder Quarzgeneratoren verwendet werden. Idealerweise erzeugt ein 2-Ton Testgenerator keine Intermodulation. Tatsächlich jedoch, liegen die selbst produzierten Intermodulationsprodukte 80 bis 100dB unterhalb der Nutzprodukte. Gute HF 2-Tongeneratoren, die als Messgerät agieren, sollten bei einer Ausgangsleistung von 2x-6dBm über eine IM3-Festigkeit von 100dBc verfügen.

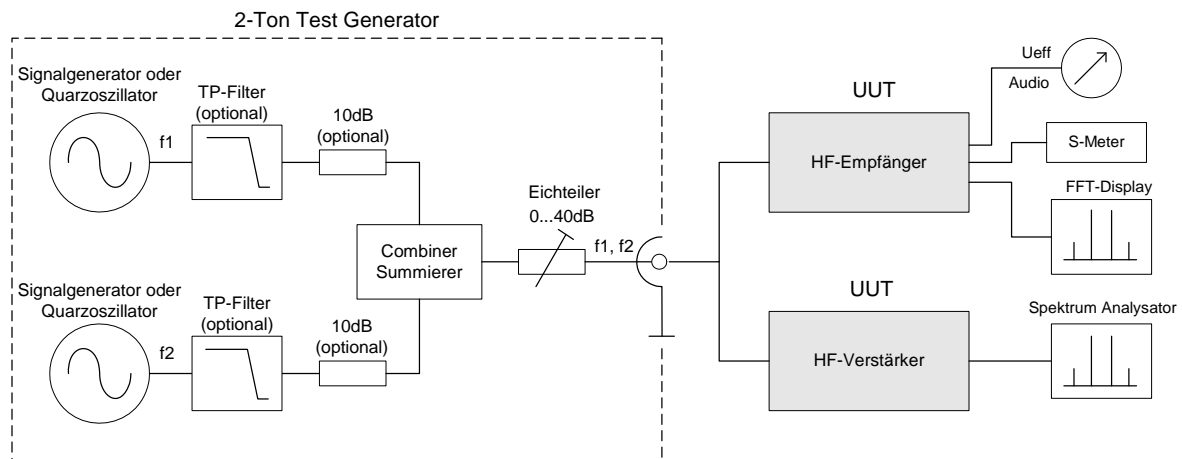


Bild 1: Aufbau für Intermodulationsmessungen

Warum die IM3-Festigkeit eines HF 2-Tongenerators so hoch sein muß, soll ein Beispiel zeigen. Ein analoger KW-Empfänger besitzt einen IP3 von +30dBm. Um den IP3 von +30dBm zu messen, legt man ein 2-Tonsignal von z.B. $P_e = 2 \times -20\text{dBm}$ an den Eingang des Empfängers und dieser erzeugt IM3-Produkte im Abstand zu den beiden Nutzprodukten von

$$\Delta\text{IM3} = (\text{IP3} - P_e) \times 2 = (30\text{dBm} - (-20\text{dBm})) \times 2 = 100\text{dBc}$$

Damit ein Signalabstand von 100dBc gemessen werden kann, muß der vom 2-Tongenerator selbst erzeugte IM3-Abstand größer als 100dB sein, ansonsten misst man die IM3 des Generators und nicht die des Empfängers. Falls die IM3-Festigkeit des Testgenerators nur 90dB beträgt, dann würde sich daraus ein IP3 ergeben von

$$\text{IP3} = \Delta\text{IM3}/2 + P_e = (90/2 + (-20\text{dBm})) = +25\text{dBm}$$

und die Großsignalfestigkeit des Empfängers würde um 5dB falsch bewertet. Fehlmessungen dieser Art, kommen in der Praxis relativ häufig und unbewusst vor, weil der Anwender oft nicht weiß, wie hoch die Intermodulationsfestigkeit seines verwendeten HF 2-Tongenerators eigentlich ist.

Nachfolgend soll gezeigt werden, wie man die IM3-Festigkeit eines HF 2-Tongenerators mit Hilfe eines Spektrum Analysators über einen intermodulationsfreien Anzeigebereich von 100dB messen kann.

2-Tontest des Analysators

Zunächst muß die Großsignalfestigkeit des verwendeten Analysators ermittelt werden. Legt man ein Signal von $P_e = 2 \times -5\text{dBm}$ an den Eingang des Analysators, entsteht ein typisches Spektrum nach Bild 1. Die entstehenden IM3-Produkte (gelbe Kurve) besitzen einen Abstand von 60dBc. Zum Schutz seines

1. Mischers, wählt der Analysator automatisch eine Einfügungsdämpfung von 15dB. Vergrößert man manuell die Dämpfung von 15dB auf 20dB, verkleinern sich die IM3-Produkte um 10dB (rote Kurve). Das zeigt, dass die entstehende Intermodulation allein vom Analysator erzeugt wird und nicht vom 2-Tongenerator. Diesen Test sollte man immer dann durchführen, wenn man nicht sicher ist, ob die Verzerrungen (Intermodulation oder Oberwelle) vom Messobjekt (hier 2-Tongenerator) oder vom Analysator erzeugt werden. Der IP3 (3rd Order Intercept Point) des Analysators beträgt demnach

$$IP3_{\text{Analysator}} = \text{IMD3}/2 + P_e = 60\text{dB}/2 - 20\text{dBm} = +10\text{dBm}$$

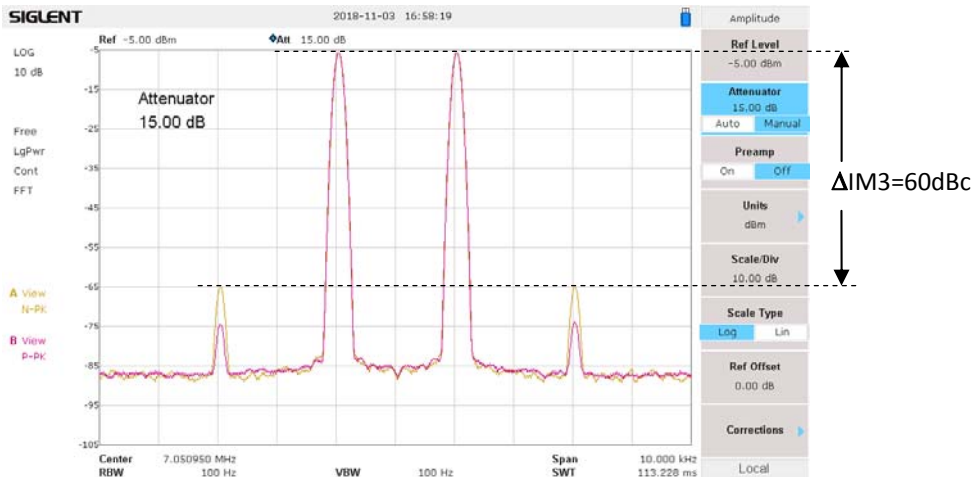


Bild 2: HF 2-Tonsignal bei 7,05MHz, Δf=2kHz, Pe=2x-5dBm, Span=10kHz

Um den intermodulationsfreien Anzeigebereich des Analysators von 60dBc auf 100dBc zu vergrößern, müsste der Analysator ein IP3 haben von

$$IP3_{\text{soll}} = \Delta\text{IM3}/2 + P_e = 100/2 + (-5\text{dBm}) = +45\text{dBm}$$

wozu eine Dämpfung von insgesamt $IP3_{\text{soll}} - IP3_{\text{Analysator}} = +45\text{dBm} - (+10\text{dBm}) = 35\text{dB}$ vorschaltet werden muß. Der optimale Arbeitspunkt für max. Großsignalfestigkeit des Analysators liegt demnach bei einem Eingangspegel von $-35\text{dBm} - 5\text{dBm} = -40\text{dBm}$. Bild 3 zeigt das Verhalten des Analysators, bei Vergrößerung der Eingangsdämpfung von 15dB auf 35dB. Damit das IM3-Signal besser zu erkennen ist, gleiche ich den Analysator auf die obere (oder untere) IM3-Frequenz ab und verkleinere den

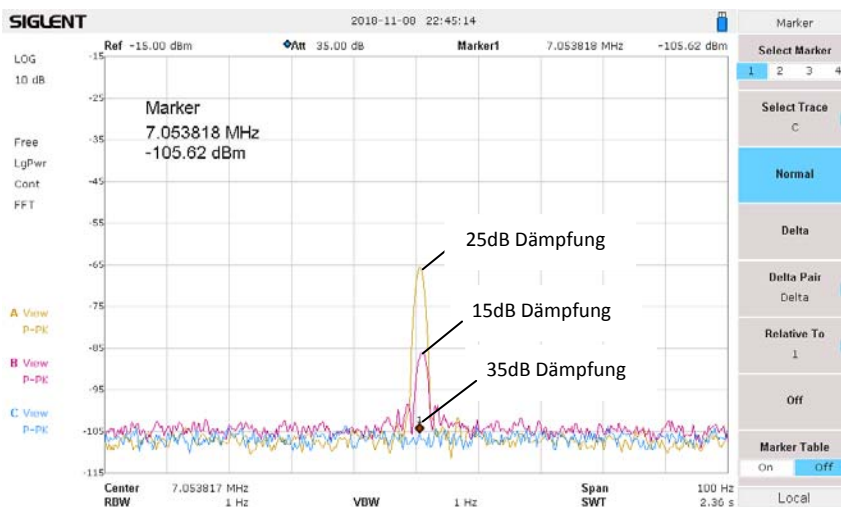


Bild 3: Erzeugte Intermodulation des Analysators bei 15, 25 und 35dB Dämpfung

Span auf 100Hz und die Auflösungsbandbreite (RBW) auf 1Hz. Gleichzeitig reduziere ich den Referenzpegel von -5dBm auf -15dBm, damit das Grundrauschen (die Messgrenze des Analysators) noch im Bildschirm zu erkennen ist. Erst bei einer Dämpfung von 35dB (grüne Kurve), verschwindet die Intermodulation im Grundrauschen und erst bei dieser Dämpfung verfügt der Analysator über einen maximalen, IM-freien Anzeigebereich von

$$\Delta IM3 = P_e - P_{\text{Noise}} = -5\text{dBm} - (-105\text{dBm}) = 100\text{dB}$$

Erst in dieser Einstellung kann die IM3-Festigkeit des 2-Tongenerators fehlerfrei ermittelt werden. Würde der 2-Tongenerator IM3-Produkte von größer 100dBc erzeugen, wären diese jetzt sichtbar. Da im Rauschen jedoch kein IM3-Signal mehr zu erkennen ist, beträgt die IM3-Festigkeit >100dB.

Daraus berechnet sich ein IP3 des 2-Tongenerators zu

$$IP3_{\text{Testgenerator}} = IMD3/2 - P_e = 100\text{dB}/2 - 5\text{dBm} = +45\text{dBm}$$

Mit dem so getesteten 2-Ton Testgenerator können demnach IP3-Messungen an Empfängern von bis zu +40dBm durchgeführt werden. Die Grenze liegt bei +45dBm, bei einem Messfehler von 3dB.

Idealer Mischerpegel eines Spektrum Analysators

Der Zusammenhang von idealem Mischerpegel in Abhängigkeit zur gewählten Auflösungsbandbreite, lässt sich auch grafisch darstellen (Bild 4). Mit einem Eingangssignal von 2x-40dBm ($P_e = -5\text{dBm} + 35\text{dB}$ Dämpfung = -40dBm) und einer Auflösungsbandbreite von 1Hz und erreicht der Analysator einen IM-freien Dynamikbereich von 100dB. Bei größeren Auflösungsbandbreiten verkleinert sich der max. IM-freie Anzeigebereich, bei RBW=1kHz verbleiben noch 80dB.

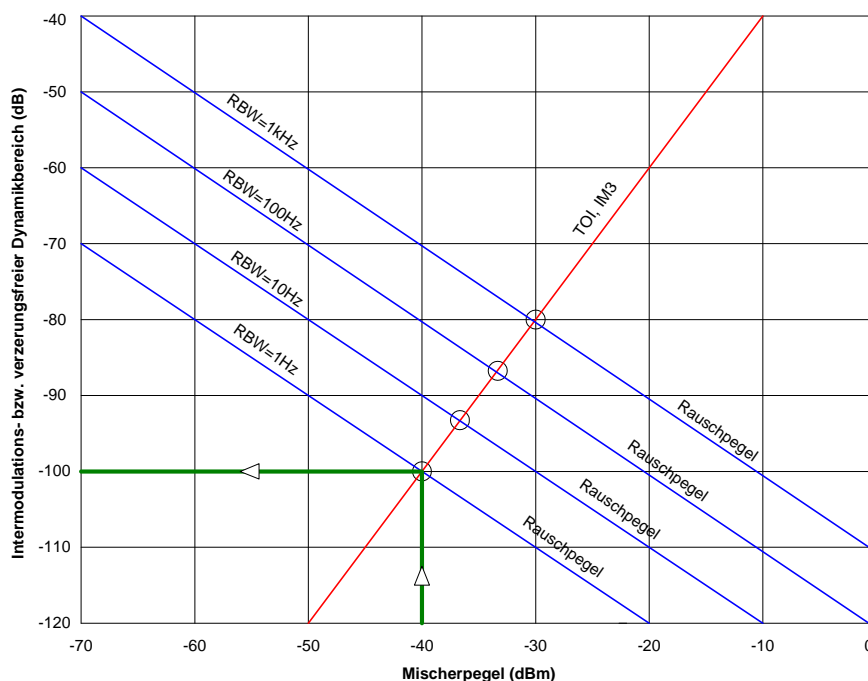


Bild 4: Intermodulationsfreier Anzeigebereich in Abhängigkeit zu Mischerpegel und Auflösungsbandbreite

IM3-Messung bei digitalen Empfängern

Auch digitale Empfänger können mit 2-Tonsignalen getestet werden. Sinnvollerweise allerdings nur an einer Stelle, nämlich kurz vor Sättigung (Saturation) des ADC's. An dieser Stelle produziert der SDR

- im Gegensatz zu analogen Empfängern - seine größte intermodulationsfreie Dynamik. Bild 5 zeigt die IMD3-Verzerrung eines direkt abtastenden 14Bit SDR's mit IM3-Produkten in einem Abstand von über 100dB.

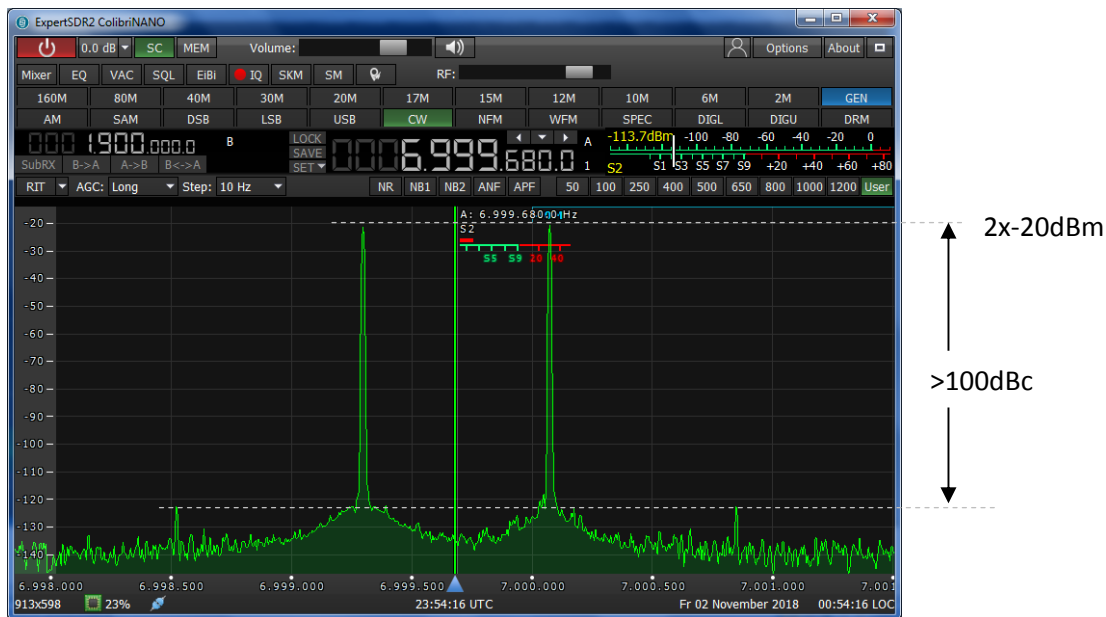


Bild 5: IM3-Messung an einen Direct-Sampling Digital Receiver, IMD3 >100dBc

Die beiden Nutzsingnale betragen 2x-20dBm und liegen kurz unterhalb seiner Begrenzung. Ein IP3 existiert hier nicht mehr, weil der Verlauf der IM3, im Gegensatz zu analogen Empfängern, keiner Gesetzmäßigkeit folgt. Würde man die gleiche Messung mit einem 2-Tongenerator machen, dessen IM3-Festigkeit nur 90dB beträgt, wären die im Bildschirm angezeigten IM3-Produkte um 10dB höher, der gemessene IMD3-Abstand wäre nur 90dBc und das Messergebnis wäre falsch.

Selektive IM3-Messung

Ein breitbandiger Spektrumanalysator muß große Signale neben sehr kleinen Signalen gleichzeitig verarbeiten, wodurch seine Dynamik insgesamt einschränkt wird. Wenn man bei einer IM3-Messung die beiden großen Nutzsingnale (f1 und f2) unterdrücken könnte, käme das der Messdynamik zugute. Aus diesem Grund schalte ich versuchsweise ein 9,002MHz, +/-1,55kHz KVG-Quarzfilter zwischen 2-Tongenerator und Analysator und stimme die Frequenzen der Nutzsingnale über zwei Messender

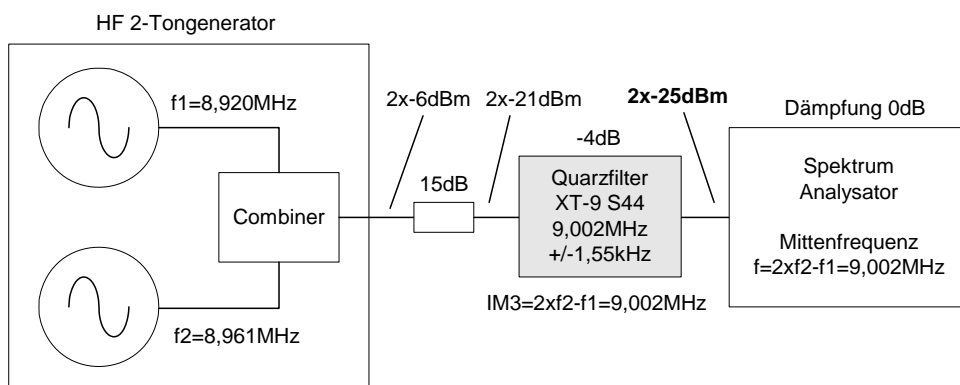


Bild 6: Messung des IMD3 über ein Filter

auf $f_1=8,920\text{MHz}$ und $f_2=8,961\text{MHz}$ ab, so dass nur das obere IM3-Signal des Generators bei $2f_2-f_1=9,002\text{MHz}$ genau in den Durchlaßbereich des Filters fällt. Das Bandpaßfilter unterdrückt jetzt alle Signale mit fast 100dB und läßt nur noch das IM3-Signal mit 4dB Durchgangsdämpfung passieren (Bild 6). Durch diesen Trick, kann der Analysator mit 0dB Dämpfung auf seine größte Empfindlichkeit (mit Preamplifier: ON) eingestellt werden, ohne dabei übersteuert zu werden.

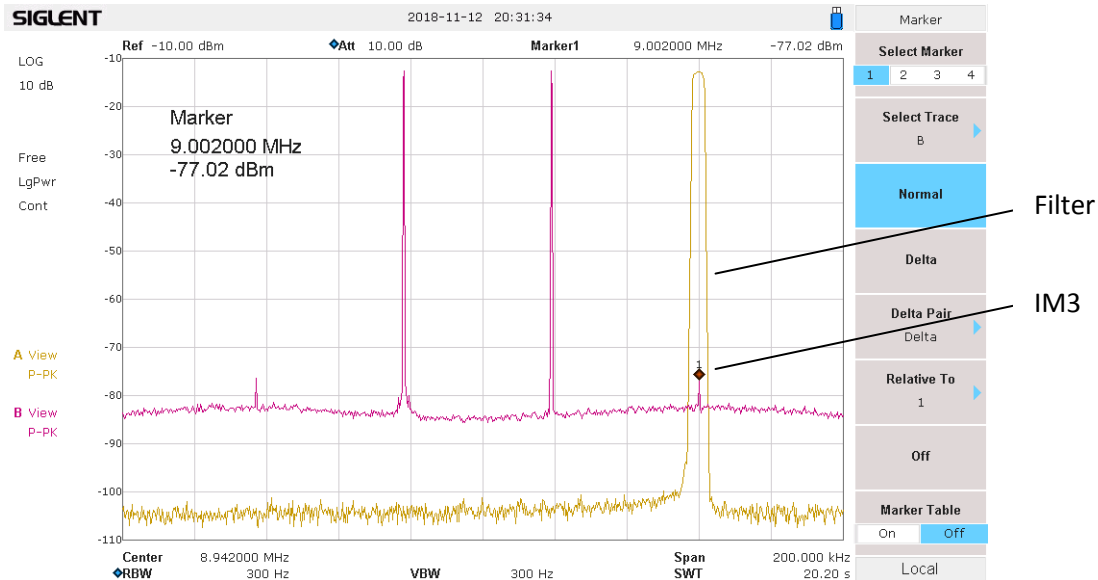


Bild 7: HF 2-Tonsignal und Ausfilterung des IM3-Produkts

Da das Filter nur im Durchlaßbereich an 50 Ohm angepasst ist, muß zwischen Generator und Filter noch ein 15dB Dämpfungsglied geschaltet, damit der Ausgang des 2-Tongenerators breitbandig mit 50 Ohm abgeschlossen wird und keine Intermodulation erzeugt. Das Prinzip der "selektiven" Messung zeigt Bild 7 und das Ergebnis der Messung Bild 8. Mit zwei Eingangssignalen von $P_e=2 \times -25\text{dBm}$ produziert der 2-Tongenerator IM3-Produkte bei -131dBm . Die IM3-Festigkeit des 2-Tongenerators beträgt demnach $\Delta\text{IM3} = -25\text{dBm} - (-131\text{dBm}) = 106\text{dBc}$.

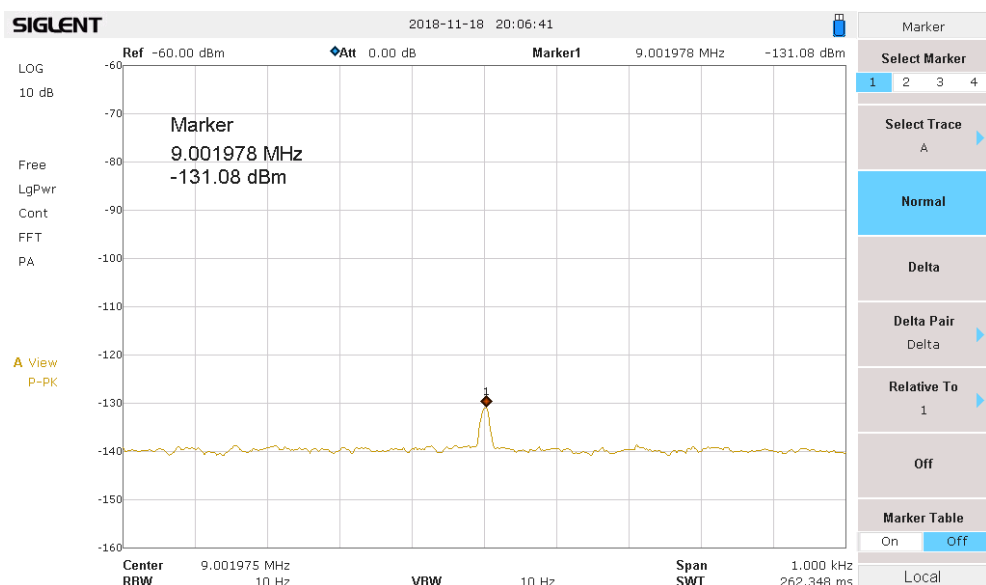


Bild 8: Ergebnis der selektiven IMD3-Messung eines 2-Tongenerators, $P_e=2 \times -25\text{dBm}$, $\text{IMD3}=-131\text{dBm}$

Für die beiden Nutzsignale musste ein relativ großen Abstand von $\Delta f = 41\text{kHz}$ gewählt werden, weil ansonsten das Seitenbandrauschen der verwendeten Signalgeneratoren (HP und Marconi) das entstehende IM3-Produkt abgedeckt hätten.

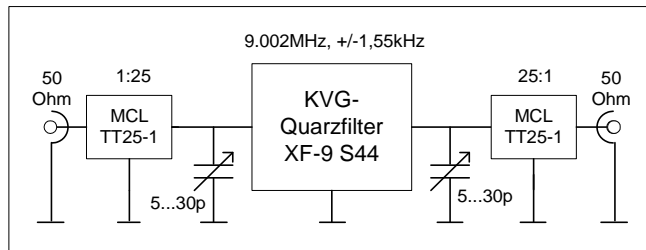


Bild 9: Verwendetes 9MHz Quarzfilter mit 50Ohm Anpassung über MCL-Übertrager

Zusammenfassung

- Wenn ein HF 2-Tongeneratoren für IM3-Messungen an Vierpolen eingesetzt wird, muß der IP3 des 2-Tongenerators größer sein als der des Messobjekts, ansonsten misst man die Intermodulation des 2-Tongenerators und nicht die des Messobjekts.
- Wird ein Spektrumanalysator für IM3- oder Oberwellen-Messungen eingesetzt, muß sein IP3 größer sein, als der des 2-Tongenerators.
- Die Kontrolle, ob das am Analysator angezeigte M3-Produkt (oder Oberwelle) am vom 2-Tongenerator oder vom Analysator erzeugt wird, kann einfach durchgeführt werden. Stammt das Signal vom 2-Ton Generator, dann bleibt dessen Pegel beim Hinzuschalten von 10dB HF-Dämpfung konstant. Wenn dagegen das IM3-Produkt (oder Oberwelle) vom Spektrumanalysator erzeugt wird, verringert sich der Pegel der IM3-Produkts (oder Oberwelle) um 20dB. Wenn beide, der 2-Tongenerator und der Spektrumanalysator, zum IM3-Produkt beitragen, ist die Reduktion des IM3-Pegels entsprechend geringer.
- Empfindlichkeit und Großsignalverhalten laufen gegeneinander. Durch Hinzufügen von Dämpfung, verliert der Analysator im gleichen Maß an Empfindlichkeit. Um trotzdem auf einen großen Anzeigebereich zu kommen, muss die kleinstmögliche Auflösungsbandbreite gewählt werden.
- Das Seitenbandrauschen der verwendeten Signalgeneratoren, des Spektrumanalysator und des Messobjekts (Empfänger) muß gering sein, so dass auch sehr kleine IM3-Signale in geringen Signalabständen von $\Delta f = 2\text{kHz}$ vom Rauschen nicht zugedeckt werden. Die Verwendung von Quarzoszillatoren im 2-Tongenerator ist vorteilhaft, weil diese nur geringes Phasenrauschen erzeugen.
- Die max. Ausgangsleistung eines 2-Tongenerators sollte 2x-0dBm nicht überschreiten. Bei höherer Leistung kann der Übertrager im Combiner (Bild 9) in Sättigung gefahren werden und dadurch IM erzeugen.

Optimierung eines 2-Tongenerators

Falls der ermittelte IM3-Abstand eines 2-Tongenerators nur 80 oder 90dB beträgt, kann das verschiedene Gründe haben. Es wird oft darüber geschrieben, dass man beide Oszillatoren hermetisch voneinander abschirmen soll, damit sie sich gegenseitig nicht "sehen" können. Das ist zwar grundsätzlich nicht falsch, bringt aber meist keine Verbesserung der IM3- Festigkeit. Nach

meiner Erfahrung, liegt der Grund nicht an einer unzureichenden Abschirmung, sondern an einer nicht ausreichenden elektrischen Entkopplung beider Generatoren. Das Herz eines 2-Ton Generators ist sein "Combiner" (Bild 9). Er hat die Aufgabe, beide Signale mit geringer Dämpfung zu einem gemeinsamen Ausgang (C) zu leiten und gleichzeitig beide Signale (A, B) möglichst stark voneinander zu entkoppeln. Die Entkopplung ist notwendig, damit sich beide Generatoren nicht gegenseitig modulieren und dadurch Intermodulation erzeugen.

Bild 10 zeigt den typischen Aufbau eines Combiner in Form einer Wheatstone-Brücke. Damit die Brücke mit optimaler Trennung arbeitet, müssen alle Ports mit 50 Ohm abgeschlossen sein. Zur Verbesserung der Anpassung, werden häufig 10dB-Dämpfungsglieder vor alle Ports geschaltet, mit dem Nachteil, dass anschließend mit höheren Leistungen gearbeitet werden muß, was andere Probleme mit sich bringt. Trotz aller Maßnahmen, beträgt die Richtschärfe der Wheatstone-Brücke in der Praxis meist nicht mehr als 40...45dB.

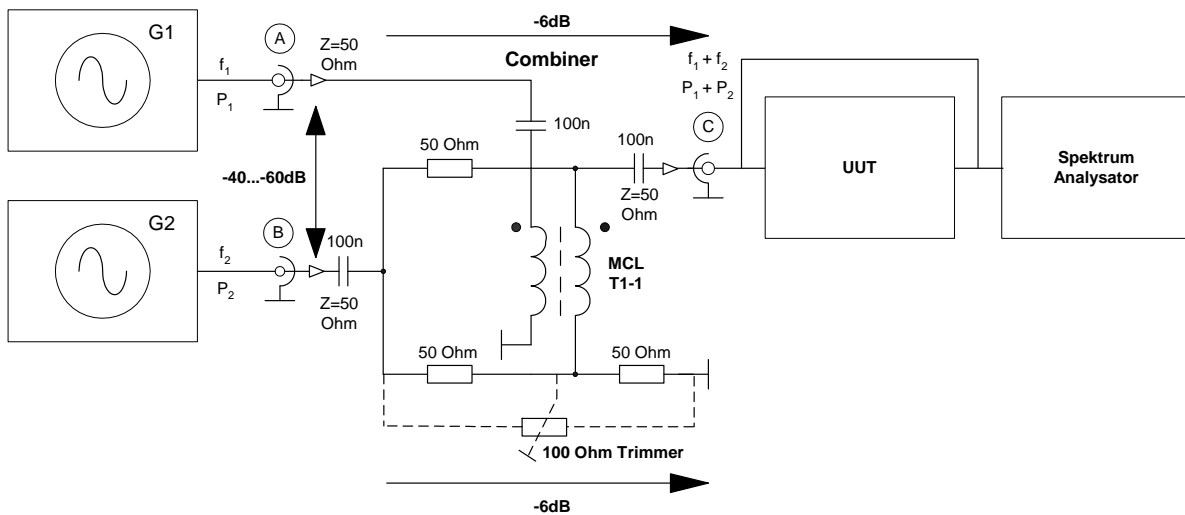


Bild 10: 2-Tongenerator mit Wheatstone-Brücke und optionalen Trimmer

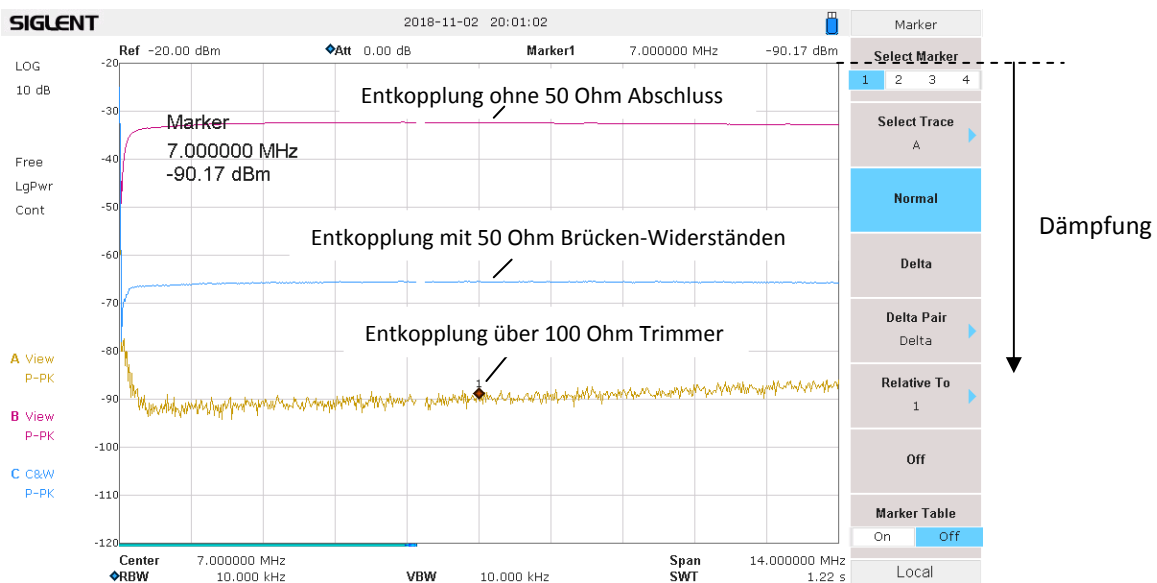


Bild 11: Entkopplung einer Wheatstone-Brücke mit und ohne Abgleich

Mit einem einfachen Trick, läßt sich die Richtschärfe aber verbessern. Wenn man zwei der 50 Ohm Brücken-Widerstände durch einen 100 Ohm Trimmer ersetzt, kann die Brücke nach Abgleich des Trimmers auf eine Entkopplung von >60dB gebracht werden. Durch diese hohe Entkopplung, wird die gegenseitige Beeinflussung der Generatoren so gering, dass sie praktisch keine Intermodulation mehr erzeugen.

Bild 11 zeigt die Entkopplung zwischen Port A (B) und B (A), mit und ohne Trimmer. Die Messung erfolgte mit einem Tracking-Generator (-20dBm) über einen Frequenzbereich von 0-14MHz. Dazu wird das TG-Signal in Port A (B) eingespeist und der Pegel in Port B (A) gemessen. Gleichzeitig muß der Brückenausgang (C) mit 50 Ohm abgeschlossen sein. Die Entkopplung sollte in beide Richtungen gemessen werden. Die verwendete Wheatstone-Brücke, aufgebaut in ein kleines Weißblechgehäuse 35x35x30mm, zeigt Bild 12.

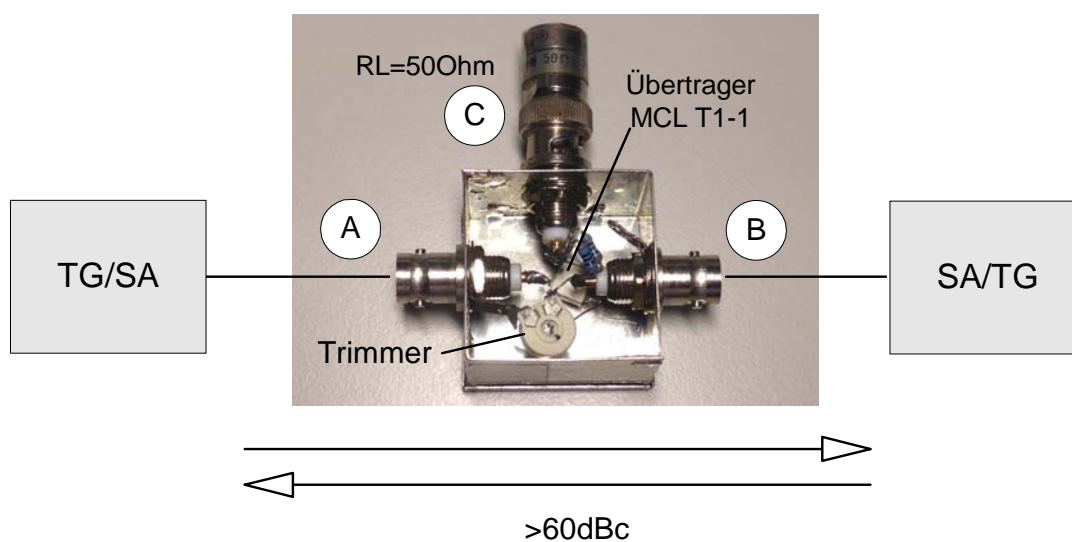


Bild 12: Messung der Richtschärfe einer Wheatstone-Brücke

Der erforderliche 50 Ohm Abschluss (RL) am Ausgangsport C stellt in der Praxis noch ein kleines Problem dar. Normalerweise wird hier ein HF-Verstärker oder HF-Empfänger zur IM3-Messung angeschlossen, deren Eingangswiderstand aber meist nicht genau 50 Ohm ist, wodurch die Brücke wieder etwas verstimmt wird und die Richtschärfe nachlässt. Deswegen sollte man zwischen Brückenausgang und Eingang Messobjekt ein 10dB-Dämpfungsglied zwischenschalten. Bei Empfängermessungen ist das aber weniger ein Problem, weil hier sowieso mit größeren Dämpfungen gearbeitet wird.

Als Übertrager kann ein selbst bewickelter Ringkern oder ein fertiger Transformator verwendet werden. Gute Ergebnisse bezüglich Entkopplung, Anpassung und Durchgangsdämpfung brachte der Breitbandübertrager T1-T-X65 (0,08-200MHz) von MCL (Funkamateurladen.de).

Ermittlung der Ausgangsimpedanz eines Oszillators

Den Aufbau von 2-Tongeneratoren wurde hier nicht beschrieben, weil es hierzu schon sehr viele Baubeschreibungen gibt. Wichtig ist nur, dass die Ausgangsimpedanz der verwendeten Oszillatoren $Z=50$ Ohm beträgt. Wie kann man die Impedanz messen? Auch das ist relativ einfach. Mit einem Oszilloskop und Tastkopf misst man die Spannung U_{ss} am offenen Ausgang des Oszillators und schließt den Ausgang anschließend mit 50 Ohm ab. Hierbei muß die Spannung auf genau $U_{ss}/2$

abfallen, dann hat der Ausgang ein Z von 50 Ohm. Ist der Ausgangswiderstand $< 50 \text{ Ohm}$, muß ein Serienwiderstand entsprechender Größe am Ausgang eingesetzt werden.

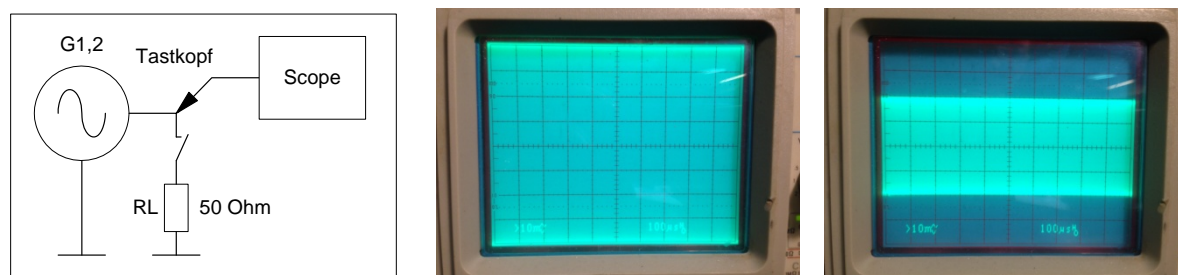


Bild 13: Messung des Ausgangswiderstands eines HF-Oszillators/Generators, im Beispiel $Z=50 \text{ Ohm}$

Werner Schnorrenberg

DC4KU

19.11.2018