

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 70 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.

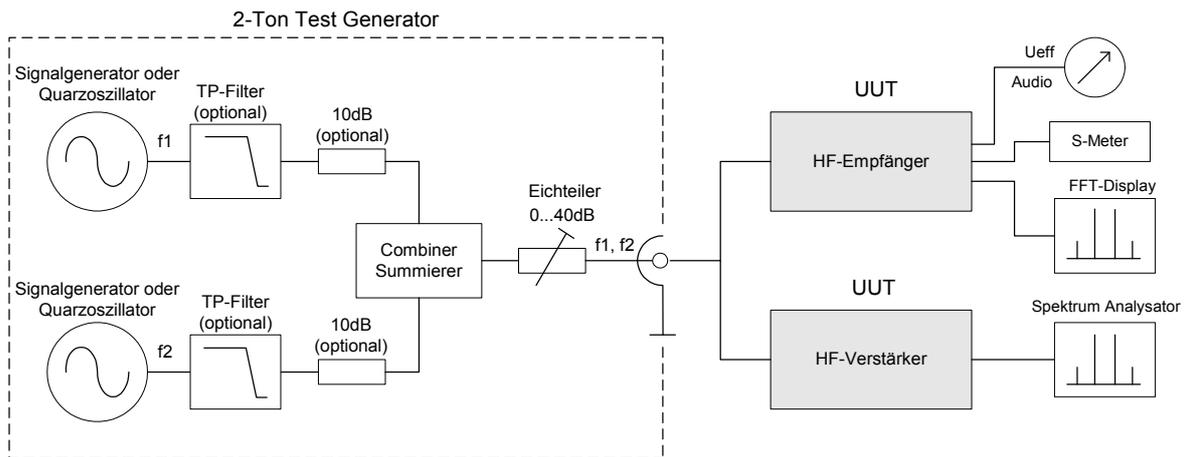


Bild 1: Aufbau für Intermodulationsmessungen

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

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

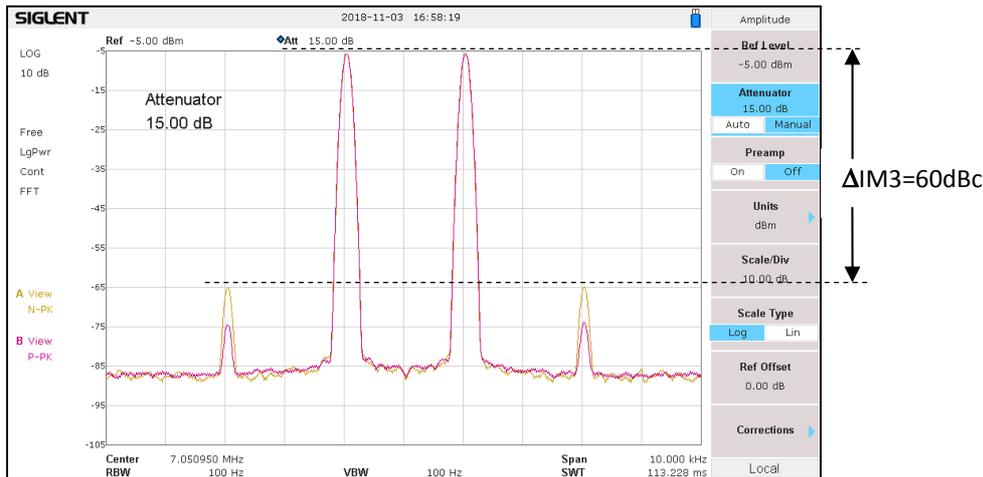


Bild 2: HF 2-Tonsignal bei 7,05MHz, Δf=2kHz, Pe=2x-5dBm, Span=10kHz

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, verkleinere den Span

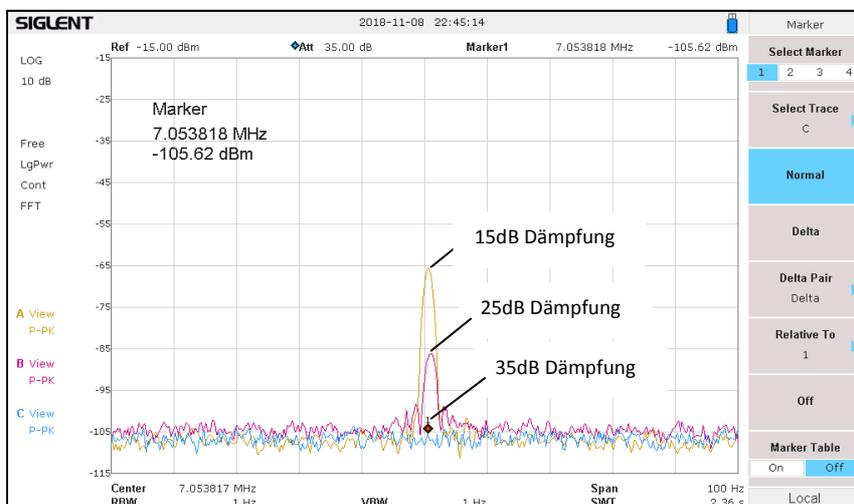


Bild 3: Erzeugte Intermodulation des Analysators bei 15, 25 und 35dB Dämpfung, Span 100Hz, BW 1Hz

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 (blaue 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 kleiner 100dBc erzeugen, wären diese jetzt sichtbar. Da im Rauschen jedoch kein IM3-Signal mehr zu erkennen ist, beträgt die IM3-Festigkeit $\geq 100\text{dB}$.

Der IP3 des verwendeten 2-Tongenerators beträgt demnach

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

Mit dem 2-Ton Testgenerator könne also IP3-Messungen an Empfängern von bis zu $IP3 = +45\text{dBm}$ durchgeführt werden. Die Grenze liegt bei +45dBm, bei einem Messfehler von $(S+N)/N = 3\text{dB}$.

Idealer Mischerpegel eines Spektrum Analysators

Der Zusammenhang von idealem Mischerpegel in Abhängigkeit zur gewählten Auflösungsbandbreite, lässt sich auch grafisch darstellen (Bild 4). Mit zwei Eingangssignalen von $2 \times -40\text{dBm}$ ($P_e = -5\text{dBm} + 35\text{dB}$ Dämpfung = -40dBm) und einer Auflösungsbandbreite von 1Hz, erreicht der Analysator einen IM-freien Dynamikumfang von 100dB. Vergrößert man die Auflösungsbandbreite, steigt das Grundrauschen an und der Messbereich verkleinert sich. Bei $RBW = 1\text{kHz}$ verbleibt nur noch ein Umfang von 80dB.

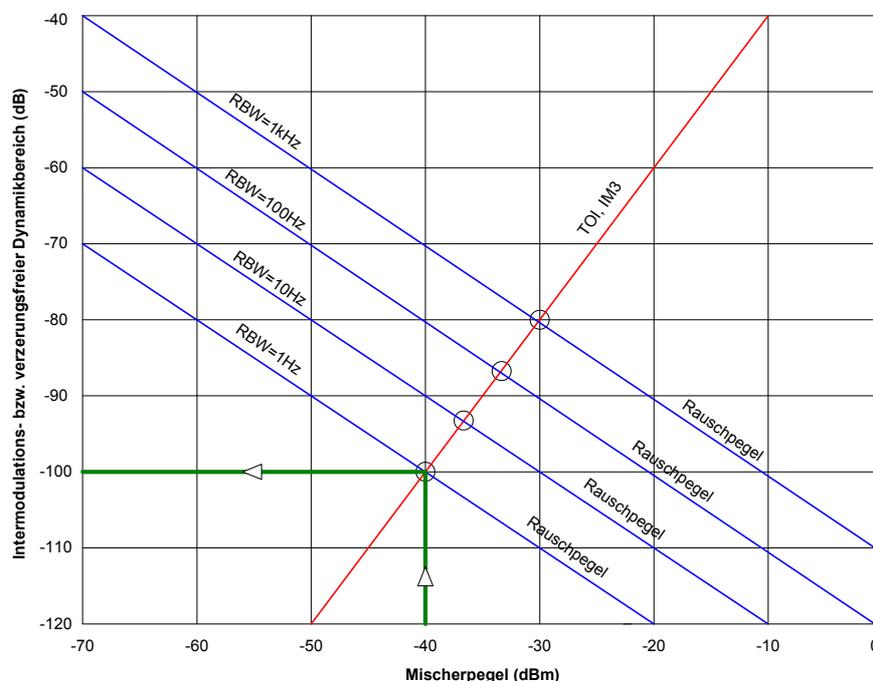


Bild 4: Intermodulationsfreier Anzeigebereich in Abhängigkeit zu Mischerpegel und Auflösungsbandbreite

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 - seinem größten IM-freien Dynamikbereich. Bild 5 zeigt die IMD3-Verzerrung eines direkt abtastenden 14Bit SDR's, mit IM3-Abständen von über 100dB.

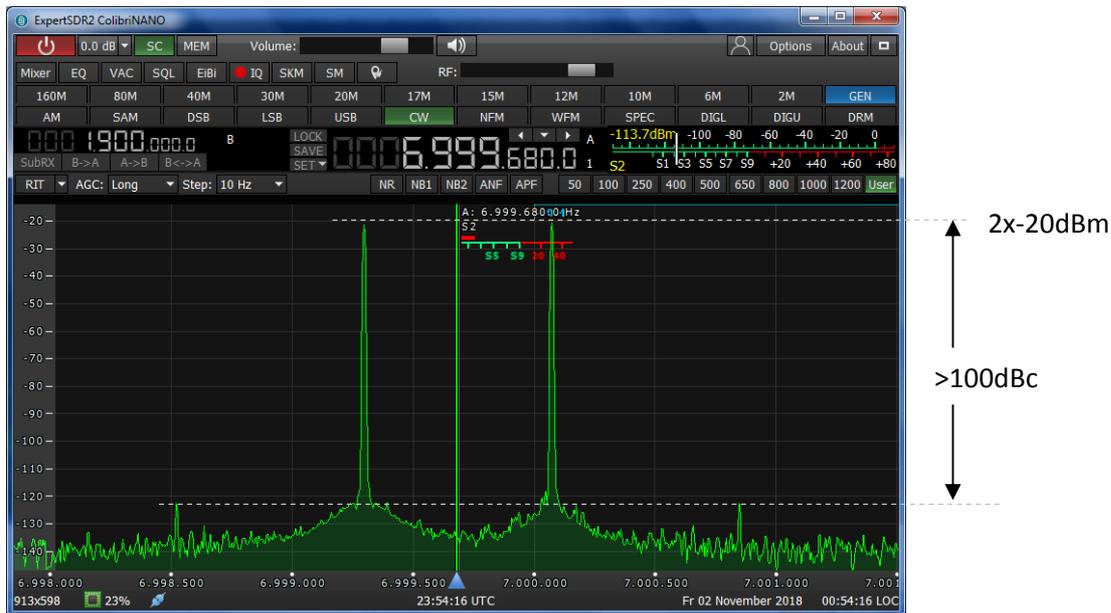


Bild 5: IM3-Messung an einen Direct-Sampling Digital Receiver, IMD3 >100dBc

Die beiden Nutzsingnale betragen 2x-20dBm und liegen kurz unterhalb seiner Begrenzung. Ein "IP3" existiert hier nicht mehr, weil der Verlauf der IM3-Produkte, im Gegensatz zu analogen Empfängern, absolut 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 ermittelte IMD3-Abstand wäre nur 90dB und das Messergebnis wäre falsch. Diese Messung zeigt deutlich, warum die IM3-Festigkeit eines 2-Tongenerators >100dB sein muß.

Selektive IM3-Messung

Ein breitbandiger Spektrumanalysator muß sehr große Signale neben 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 KVG-Quarzfilter 9,002MHz, +/-1,5kHz zwischen 2-Tongenerator und Analysator und stimme die Frequenzen der Nutzsingnale über zwei Messender

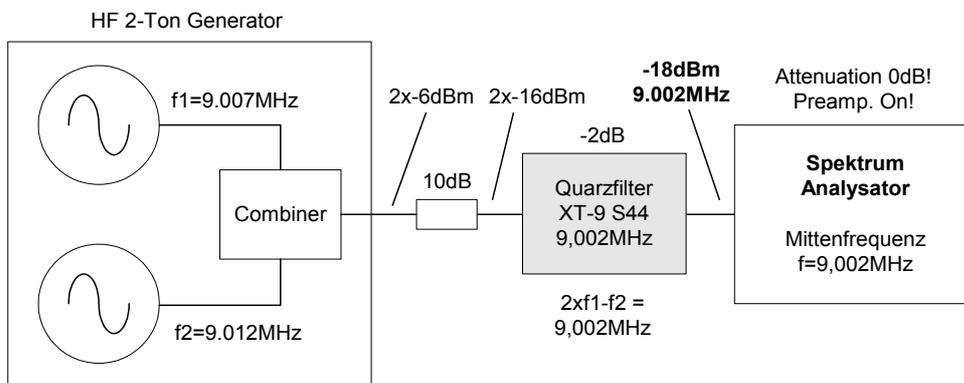


Bild 6: Messung des IMD3 über ein Quarz-Filter, Mittelfrequenz 9.002MHz, Bandbreite +/-1,5kHz

auf $f_1=9,007\text{MHz}$ und $f_2=9,012\text{MHz}$ ab, so dass nur das untere IMD3-Signal bei $2xf_1-f_2=9,002\text{MHz}$ genau in den Durchlaßbereich des Filters fällt. Das Quarzfilter unterdrückt jetzt die beiden Nutzsignale um ca. 80dB und läßt nur noch das IMD3-Signal mit 2dB Durchgangsdämpfung passieren (Bild 6). Durch diesen Trick, kann der Analysator mit 0dB Dämpfung und eingeschaltetem Preamplifier auf seine größte Empfindlichkeit eingestellt werden, ohne dabei übersteuert zu werden! Da das Filter nur im Durchlaßbereich an 50 Ohm angepasst ist, muss man zwischen Combiner und Filter noch ein 10dB Dämpfungsglied schalten, damit der 2-Tongenerators auch außerhalb des Filter-Durchlassbereichs noch mit ca. 50 Ohm abgeschlossen ist und selbst keine Intermodulation erzeugt.

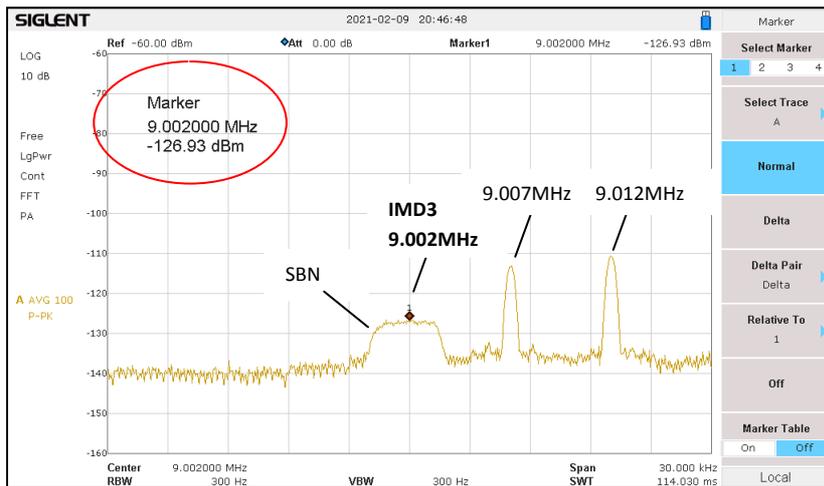


Bild 7: Das IMD3-Signal des 2-Ton Generators wird noch vom SBN der Generatoren überdeckt

Das Prinzip dieser "selektiven Messung" zeigt Bild 7. Das IMD3-Produkt liegt jedoch noch unterhalb des Seitenbandrauschens der Generatoren (oder des SA) und kann noch nicht identifiziert werden. Erst nach Verkleinerung des Spans auf 1kHz und Reduzierung der Auflösungsbandbreite auf 3Hz, läßt sich das IMD3-Produkt so gerade mit 3dB über dem Rauschen messen. Das tatsächliche IMD3-Signal liegt deswegen noch 3dB darunter, bei -144dBm.

Ergebnis: Mit zwei Eingangssignalen von $P_e = 2 \times -18\text{dBm}$ produziert der 2-Ton Messplatz IMD3-Produkte von -144dBm. Die IMD3-Festigkeit des 2-Tongenerators beträgt demnach

$$\text{DR3 (Dynamic Range 3rd-Order)} = -18\text{dBm} - (-144\text{dBm}) = 126\text{dBc}$$

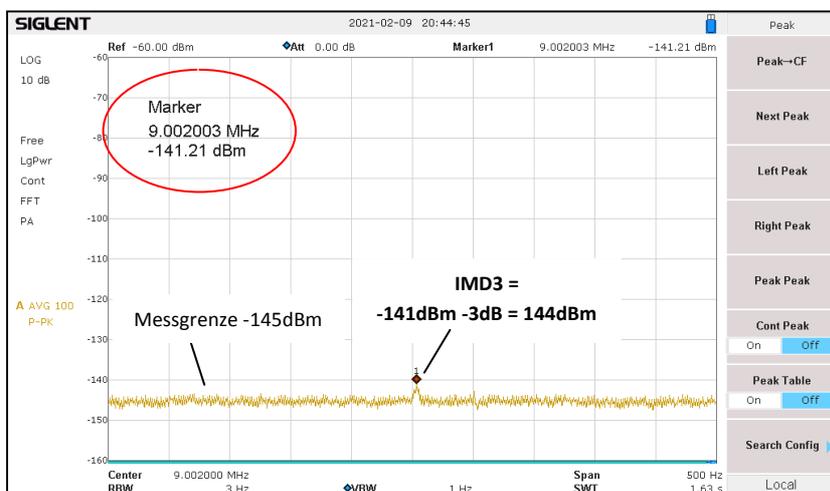


Bild 8: Ergebnis der selektiven IMD3-Messung eines 2-Tongenerators, $P_e=2x-18\text{dBm}$, $\text{IMD3}=144\text{dBm}$

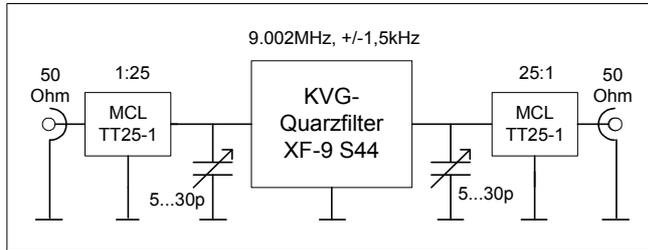


Bild 9: Verwendetes 9MHz Quarzfilter mit 50 Ohm Anpassung über MCL-Übertrager

Optimierung eines 2-Tongenerators

Falls der ermittelte IMD3-Abstand eines 2-Tongenerators nur 90 oder 100dB 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 IMD3-Festigkeit. Nach meiner Erfahrung, liegt der Grund nicht an unzureichender Abschirmung, sondern an einer nicht ausreichenden dynamischen Entkopplung beider Generatoren. Das Herz eines 2-Ton Generators ist sein "Combiner" (Bild 10). Er hat die Aufgabe, beide Signale (A, B) mit geringer Dämpfung zu einem gemeinsamen Ausgang (C) zu leiten und gleichzeitig beide Signale möglichst stark voneinander zu entkoppeln. Diese Entkopplung in dB 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 genau 50 Ohm abgeschlossen sein. Zur Verbesserung der Anpassung, werden häufig 10dB-Dämpfungsglieder vor alle Ports geschaltet, mit dem Nachteil, so 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.

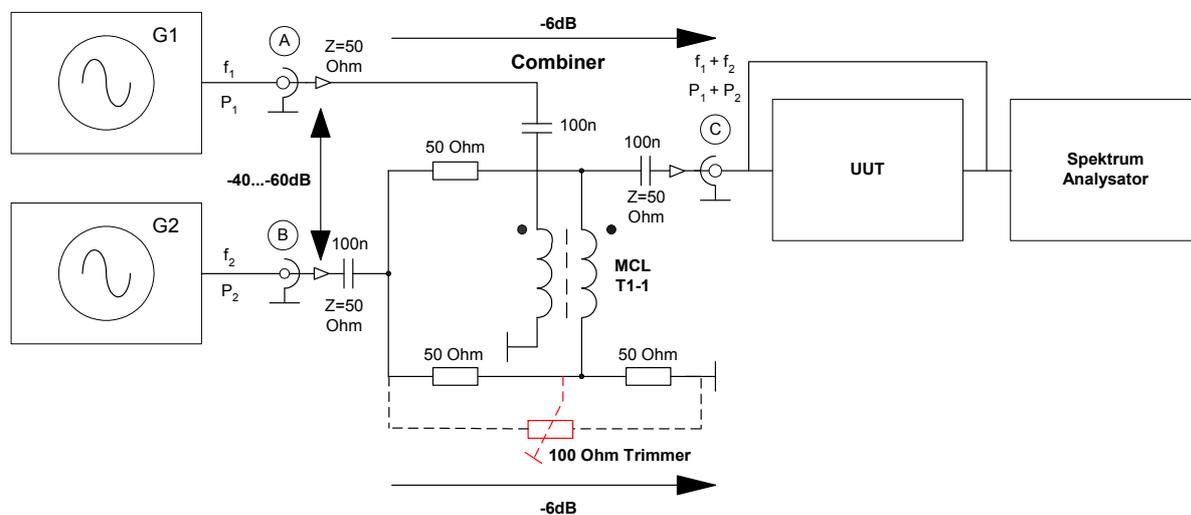


Bild 10: 2-Tongenerator mit Wheatstone-Brücke und optionalen Trimmer

Mit einem einfachen Trick, lässt sich die Richtschärfe aber verbessern. Wenn man zwei der 50hm-Brücken-Widerstände durch einen 100 Ohm Trimmer ersetzt, kann die Brücke nach Abgleich des Trimmers auf eine Entkopplung von über 65dB gebracht werden. Durch diese hohe Entkopplung, wird die gegenseitige Beeinflussung der Generatoren so gering gehalten, dass sie praktisch keine Intermodulation mehr erzeugen.

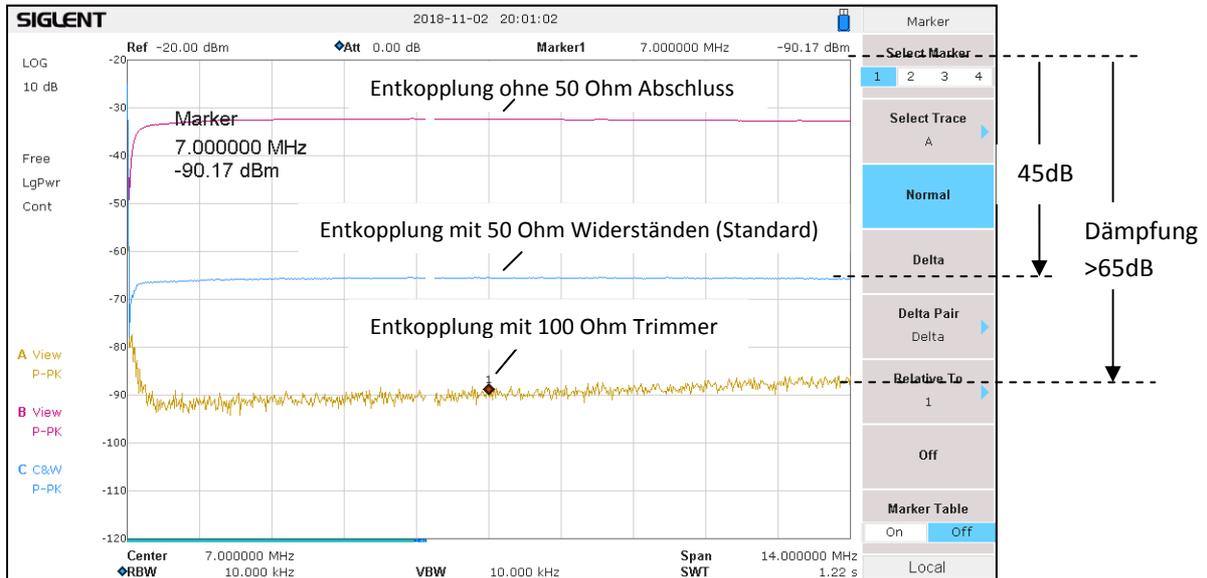


Bild 11: Entkopplung einer Wheatstone-Brücke mit und ohne Abgleich

Bild 10 zeigt den Aufbau des Combiner, mit und ohne Trimmer. Die Messung der Entkopplung erfolgte mit einem Tracking-Generator (Pegel -20dBm) über einen Frequenzbereich von 0-14MHz (Bild 11). Dazu wird das TG-Signal in Port A (B) eingespeist und der Pegel in Port B (A) gemessen. Gleichzeitig wird der Brückenausgang (C) mit 50 Ohm abgeschlossen. Die Entkopplung sollte in beide Richtungen gemessen werden. Die von mir verwendete Wheatstone-Brücke mit 100 Ohm-Trimmer, aufgebaut in ein kleines Weißblechgehäuse, zeigt Bild 12.

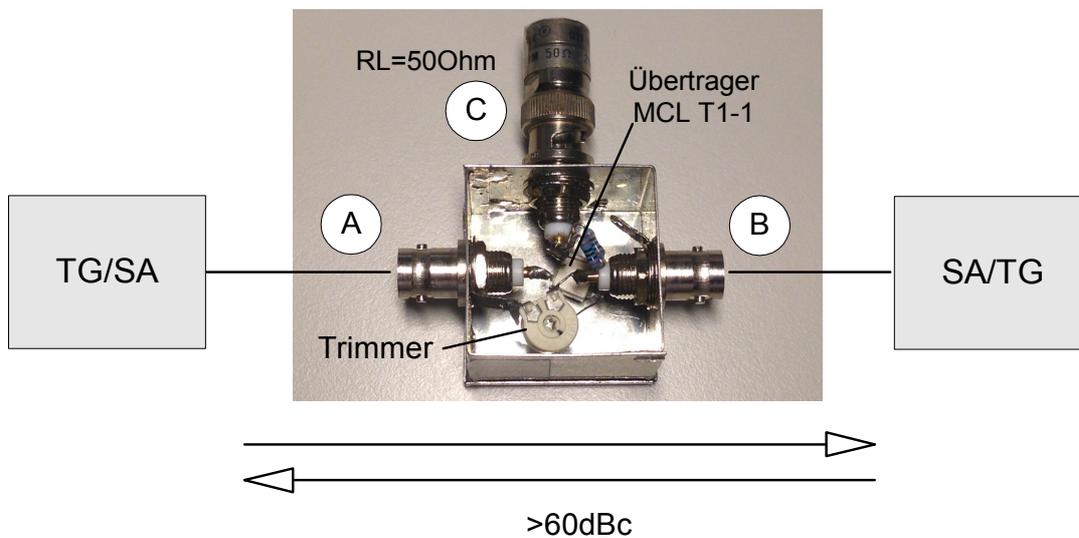


Bild 12: Messung der Richtschärfe einer Wheatstone-Brücke

Der erforderliche 50 Ohm Abschluss (RL) am Ausgangsport C stellt bei praktischen Messungen noch ein kleines Problem dar. Normalerweise wird hier ein HF-Verstärker oder Empfänger zur IMD3-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 möglichst ein 10dB-Dämpfungsglied zwischenschalten. Als Übertrager kann ein selbst bewickelter Ringkern oder ein fertiger Transformator verwendet werden. Beste Ergebnisse bezüglich Entkopplung, Anpassung und Durchgangsdämpfung brachte der Breitbandübertrager T1-T-X65 (0,08-200MHz) von MCL (FunkamateurlineShop).

Ermittlung der Ausgangsimpedanz von Oszillatoren

Den Aufbau eines HF 2-Ton Generators wurde hier nicht beschrieben, weil es schon sehr viele Baubeschreibungen hierzu 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. Wenn die Spannung auf genau $U_{ss}/2$ abfällt, hat der Ausgang ein Z von 50 Ohm. Ist die Impedanz kleiner als 50 Ohm, muß ein Serienwiderstand entsprechender Größe im Ausgang eingesetzt werden.



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

Werner Schnorrenberg

DC4KU

05.03.2019, Revision 2.2021