

Dipl.-Ing. Werner Schnorrenberg
Habichtweg 30
D-51429 Bergisch Gladbach

In-Band-Intermodulationsfestigkeit von HF-Empfängern

Moderne KW-Empfänger verfügen heute über einen Intercept Point 3. Ordnung (IP_3) von +40dBm (10 Watt) und sind damit gegen Störungen starker Signale im Nachbarkanal praktisch immun geworden.

Mit solchen, auf Grossignalfestigkeit und Dynamik getrimmten Empfängern, sollten die gefürchteten Intermodulationsstörungen selbst bei Einsatz leistungsfähiger Antennen der Vergangenheit angehören.

Die Messung des Intermodulationsabstands erfolgt im Regelfall mit zwei unmodulierten HF-Signalen, die in Abständen von 100kHz bis 20 kHz zueinander stehen. Diese Ergebnisse werden in den Datenblättern veröffentlicht. Für Signalabstände kleiner 20 kHz treffen Hersteller (seltsamerweise) meist keine Aussagen über die Störfestigkeit ihrer Empfänger. Das ist zumindest verwunderlich, da es auf den KW-Bändern nur selten vorkommt, dass alle Empfangssignale >20kHz voneinander entfernt sind. So stellt sich die Frage, ob denn der Signalabstand eventuell einen Einfluss auf die Intermodulationsfestigkeit des Empfängers hat.

Leider ist dem so, jedoch nur bei Empfängern, die nach dem Prinzip der Mehrfachüberlagerung arbeiten (und das tun sie fast alle). Unterschreitet der Frequenzabstand der Empfangssignale die Bandbreite des hinter dem ersten Mischers angebrachten Quarzfilters (auch „Roofing-Filter“ genannt), sinkt die Intermodulationsfestigkeit im Regelfall deutlich ab, weil nunmehr der 2. Umsetzer für die IM-Festigkeit des Empfängers verantwortlich ist. Wurde der 2. Umsetzer nicht mit der gleichen IM-Festigkeit wie die des 1. Umsetzers ausgestattet, verschlechtert sich die Großsignalfestigkeit zwangsläufig (**Bild 1**).

Die in der zweiten ZF entstehende Intermodulation bezeichnet man als sog. „In-Band Intermodulation“. Wären die Bandbreiten der Roofing-Filter immer identisch mit den wählbaren Auflösungsbandbreiten in der zweiten ZF, käme es zu keiner „In-Band Intermodulation“. Sind die Roofing-Filter jedoch als feste Bandbreiten von z.B. 6kHz (für CW, SSB, AM) und 15 kHz (für FM) ausgeführt, dann kann es zumindest in den Betriebsarten SSB/CW zu In-Band-Intermodulationsstörungen kommen.

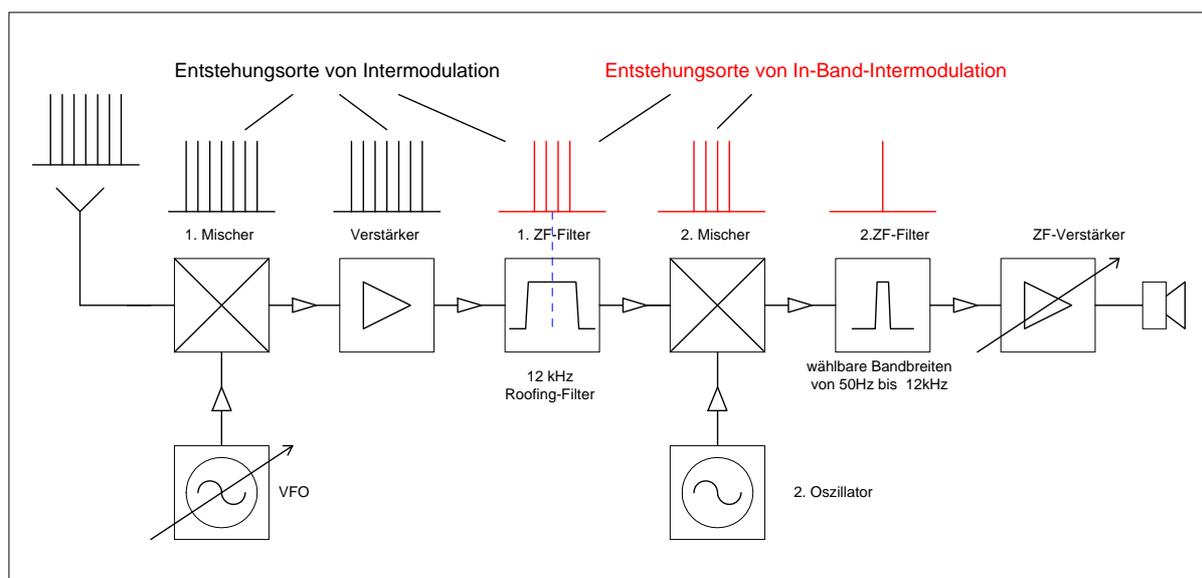


Bild 1: Prinzipschaltbild eines Doppelsuperhet mit Vorselektion in der 1.ZF und endgültiger Selektion der in 2. ZF/DSP

Bei Einfach-Superhets (**Bild 2**), wo die gesamte Selektion entsprechend der gewählten Betriebsart mit wählbaren Filtern ausschließlich in einer einzigen ZF erfolgt, kann eine In-Band-Intermodulation in der beschriebenen Form nicht auftreten.

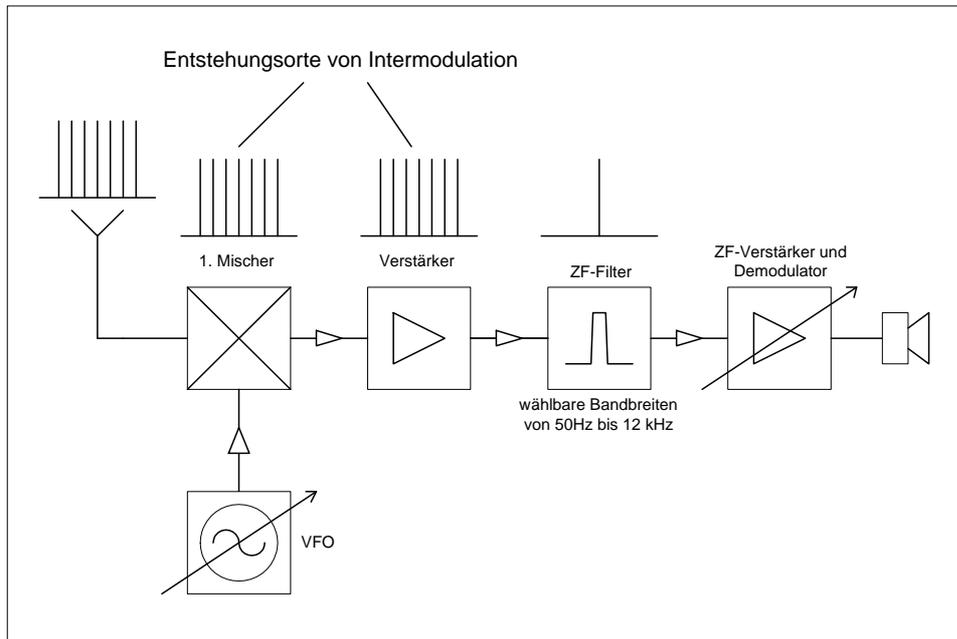


Bild 2: Prinzipschaltbild eines Einfachsuperhets mit vollständiger Signalselektion innerhalb einer einzigen ZF. In-Band-IM kann hier nicht entstehen.

Messebeispiele

Zunächst wurden Messungen an einem älteren, selbst gebauten „Standard“ KW-Doppelsuperhet durchgeführt, mit 1. ZF bei 40MHz und 12kHz Bandbreite und 2. ZF mit schaltbaren 9 MHz-KVG-Filtern für FM (12kHz), AM (6kHz) und SSB (2,4kHz).

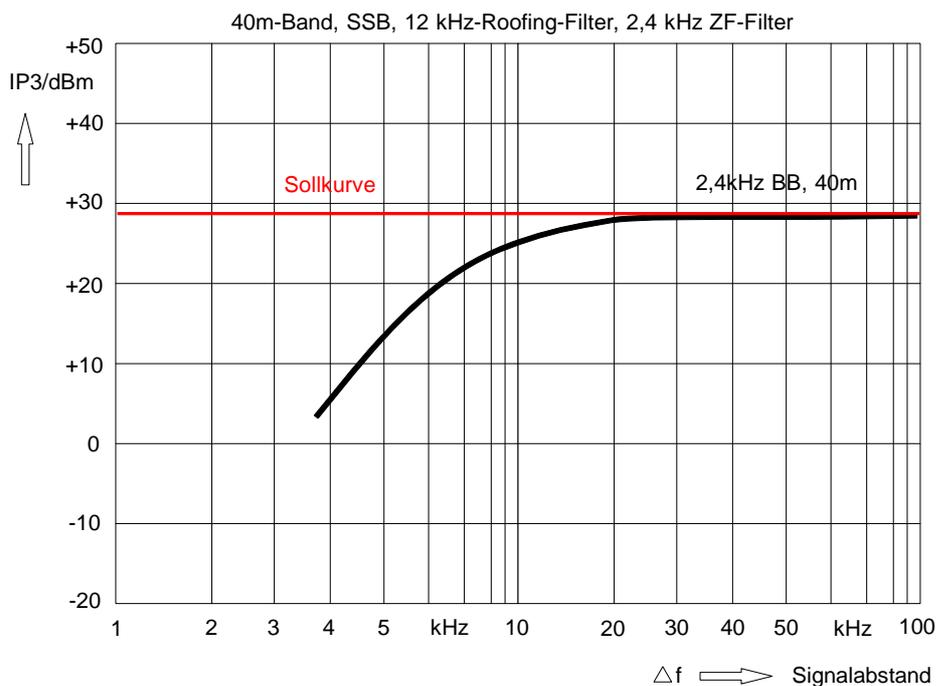


Bild 3: IP₃ in Abhängigkeit vom Signalabstand

Bei Signalabständen, ausgehend von 100 kHz bis herunter zu 20 kHz, ergibt sich auf allen Bändern ein IP_3 von +28dBm (**Bild 3**). Wird der Signalabstand weiter verkleinert, nehmen die Intermodulationsverzerrungen zu, verursacht durch einsetzende Inband-Intermodulation in der 2. ZF (2. Mischer). Bei einem Signalabstand von 4 kHz fällt der IP_3 auf einen Wert von +5dBm ab. Weiter konnte der Signalabstand nicht verkleinert werden, da die Selektion des kleinsten zur Verfügung stehenden Filters nur 2,4kHz beträgt.

Welche Auswirkungen der Verlust an Intermodulationsfestigkeit für den verzerrungsfreien Dynamikbereich des Empfängers hat, veranschaulicht **Bild 4**. Bei Signalabständen von ≥ 20 kHz beträgt der dynamische, verzerrungsfreie Empfangsbereich 103dB (blaue Linie), bei einem Signalabstand von 4kHz jedoch nur noch 87dB (rote Linie).

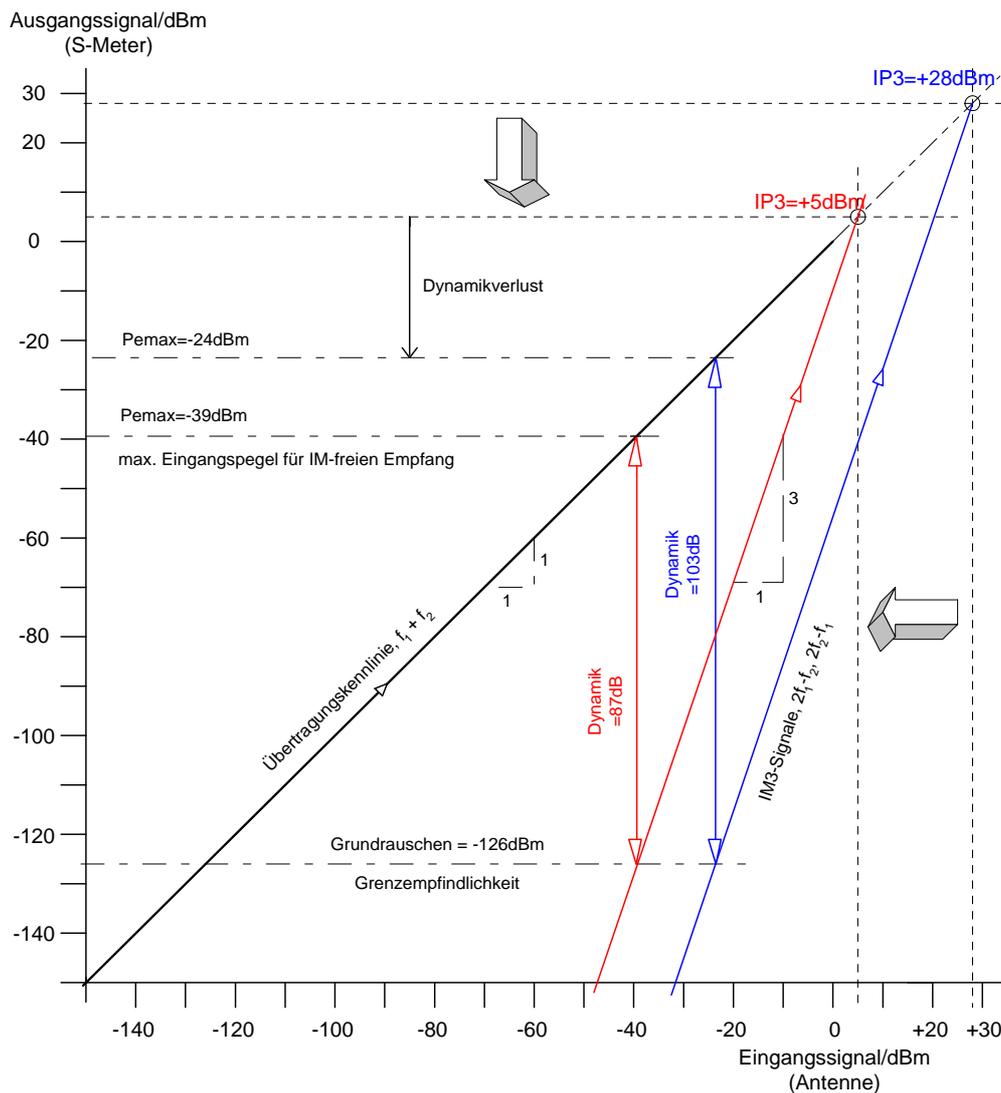


Bild 4: Dynamikbereich für Signalabstände >20kHz (blau) und 4kHz (rot)

Gleiche Messungen wurden mit einem **IC7800**, bei folgender Grundeinstellung durchgeführt: 40m-Band, Betriebsart CW/SSB, 6-kHz-Roofingfilter und 50Hz-Auflösungsbandbreite. Testsignal: HF-Doppeltonsignal mit Abständen von 100-, 50-, 20-, 5- und 2kHz.

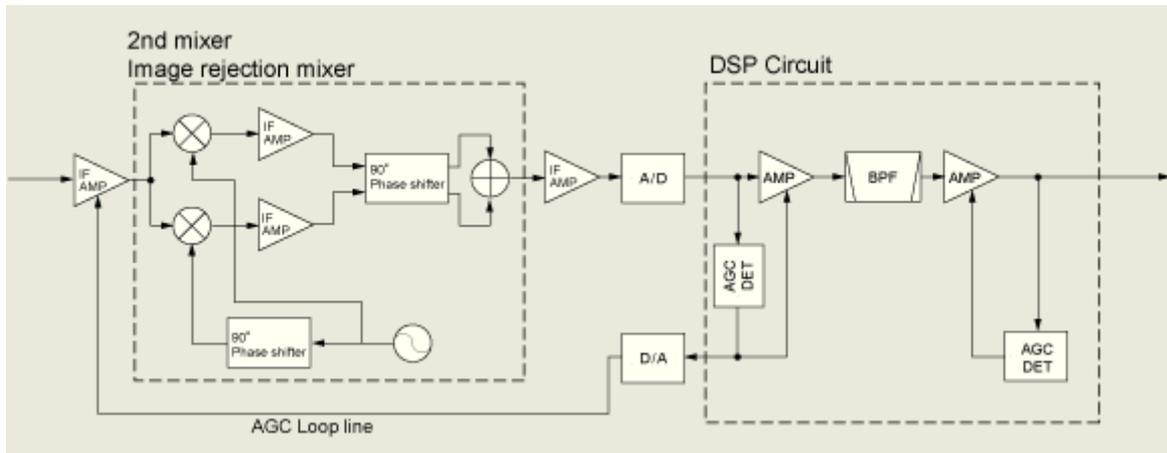


Bild 5: ICOM 7800 Blockschaltbild

Bei Signalabständen von 100 kHz bis 20 kHz ergeben sich sehr gute IP_3 -Werte von $\geq +40\text{dBm}$, welche den Datenblattangaben entsprechen. Mit einer Empfindlichkeit (Grundrauschen) von -136dBm in 50Hz-Bandbreite, resultiert daraus ein intermodulationsfreier Dynamikbereich von satten 117dB! Mit anderen Worten: Zwei Empfangssignale der Stärke $S9+52\text{dB}$ erzeugen Intermodulationsprodukte 3.Ordnung, deren Pegel dem Grundrauschpegel des Empfängers entsprechen, also gerade erst hörbar sind.

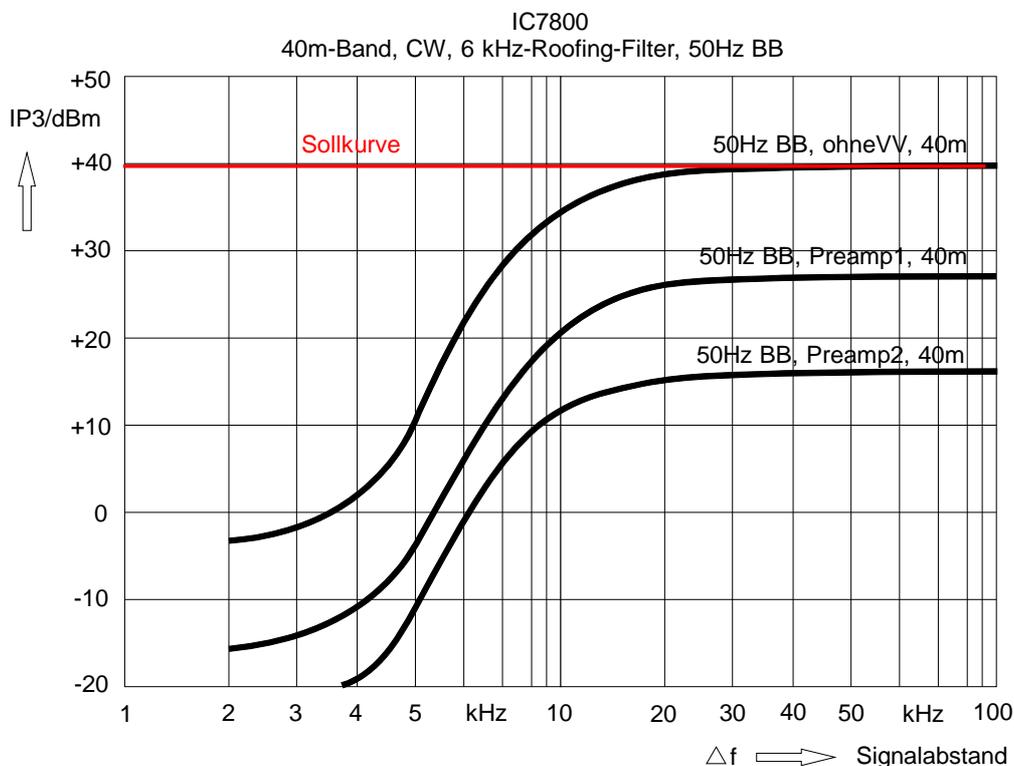


Bild 6: IP_3 in Abhängigkeit vom Signalabstand, IC 7800

Bei Signalabständen $<20\text{kHz}$ entstehen auch im IC7800 starke Intermodulationsstörungen, die bei 2kHz in einem IP_3 von lediglich -3dBm resultierenden (Bild 6). Hierbei verkleinert sich der verzerrungsfreie Dynamikbereich von zuvor 117dB auf magere 89dB , der entstehende Dynamikverlust beträgt 28dB . Nach Zuschaltung von Vorverstärkern verschlechtern sich der IP_3 noch weiter, jeweils um das Maß der gewählten Verstärkung.

Überraschend in diesem Zusammenhang war, dass nach Anwahl des breiten (falschen) 15kHz -Roofing-Filters anstelle des vorgewählten 6kHz -Roofing-Filters, sich der IP_3 deutlich verbesserte. Mit dem 15kHz -Roofing-Filter und 2kHz -Signalabstand ergab sich ein IP_3 von $+12\text{dBm}$ und ein daraus resultierender Dynamikumfang von 99dB .

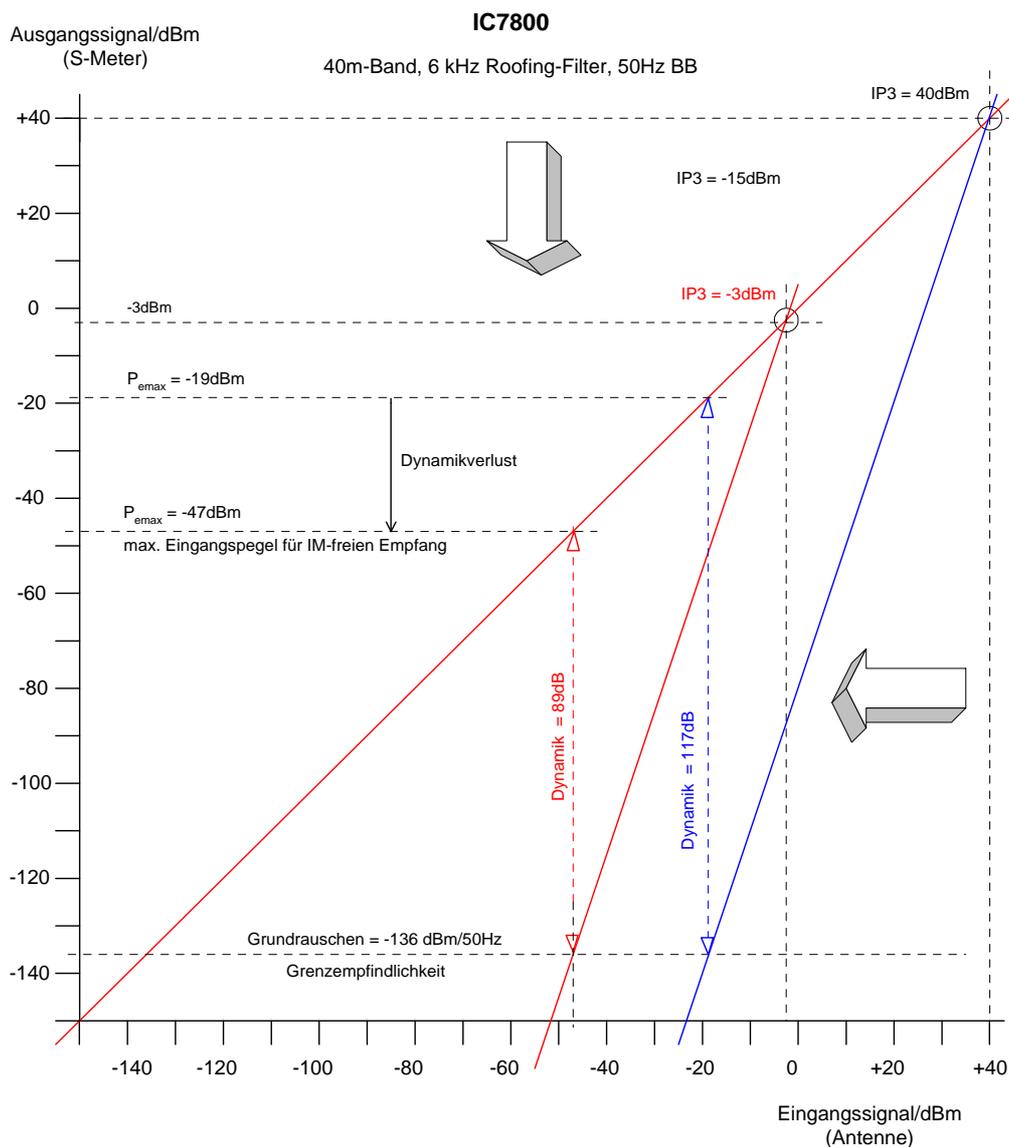


Bild 7: Dynamikbereich für Signalabstände $>20\text{kHz}$ (blau) und 2kHz (rot), IC7800

Durchführung einer In-Band- IM_3 Messung

Den prinzipiellen Messaufbau zur Bestimmung von Intermodulation zeigt **Bild 8**. Die Messung der In-Band Intermodulation ist vom Aufbau her identisch mit der ein „normalen“ IM_3 -Messung (**3**), allerdings mit dem Unterschied, dass die Testsignale einen sehr geringen Abstand zueinander haben. Deswegen sind einige Besonderheiten zu beachten:

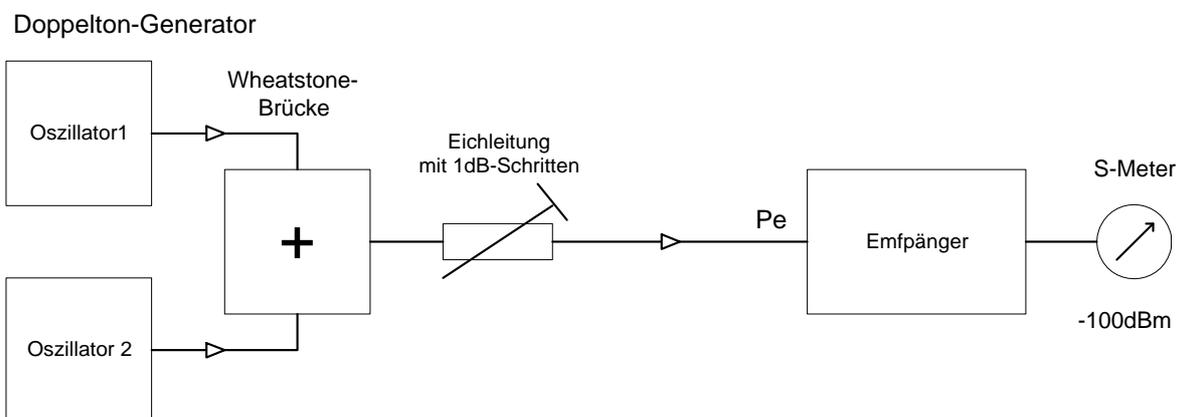


Bild 8: Messaufbau zur Bestimmung von IM_3

Frequenzabstand der Doppeltonsignale

Grundsätzlich müssen zwei Testsignale verwendet werden, deren Frequenzabstand zueinander mindestens 3-fach kleiner als die Bandbreite des eingesetzten Roofing Filters ist, damit sich das obere bzw. untere IM_3 -Produkt fehlerfrei erfasst lässt. Beträgt die Bandbreite des eingesetzten Roofing-Filters z.B. 6 kHz, darf der Abstand der Doppeltonsignale nicht größer als 2 kHz sein. Die Bandbreite der nachfolgenden ZF/DSP muß zur eindeutigen Selektion der Signale entsprechend klein gewählt werden, im Beispiel ≤ 500 Hz.

Seitenbandrauschen

In Trägernähe werden die zu messenden IM -Produkte durch zunehmendes Phasen- und Seitenbandrauschen, verursacht durch reziprokes Mischen, zugedeckt. Der Empfänger verliert dadurch an Empfindlichkeit, er wird desensibilisiert, wie in **Bild 9** illustriert. Deswegen kann die in (2,3) beschriebene „3-dB-Methode“ bei IM_3 -Messungen mit geringen Signalabständen nicht mehr angewendet werden. Stattdessen muss mit der „-100dBm-Methode“ bzw. „S4-Methode“ gearbeitet werden, bei der die Amplituden der Doppeltonsignale so weit erhöht werden, bis die IM_3 -Störprodukte einen definierten Pegel von z.B. -100dBm erreichen. Voraussetzung ist weiter, dass die ermittelten IM_3 -Signale gemäß $(S+N)/N$ ca. 10dB oberhalb des Seitenbandrauschens liegen, damit der Amplitudenmessfehler gering bleibt. Falls das Seitenbandrauschen des Empfängers die IM_3 -Signale weiterhin zudeckt, muss mit noch größeren Pegeln gearbeitet werden. Dies ist aber nur bei sehr signalfesten Empfängern empfehlenswert, da bei Signalen >0 dBm sog. Blocking-Effekte auftreten können, die das Ergebnis verfälschen können.

Doppeltongenerator

Käufliche HF-Generatoren – praktisch egal welcher Qualität – können aufgrund ihres Seitenbandrauschens bei Signalabständen <10 kHz grundsätzlich nicht verwendet werden. Das Seitenbandrauschen der HF-Generatoren, in Verbindung mit dem Seitenbandrauschen der Empfänger-Oszillatoren, würde das IM_3 -Messsignal zurauschen. Ein geeigneter Doppeltongenerator mit geringem Oberwellengehalt zeigt **Bild 10**. Ein weiterer, wichtiger Punkt für fehlerfreie Messungen, ist die Signalentkopplung der Generatoren zueinander. Auf keinen Fall dürfen hier handelsübliche „3-dB-Koppler“ oder sonstige käufliche RF-Power-Splitter verwendet werden. Die Generatoren dürfen sich gegenseitig praktisch nicht „sehen“, da sie ansonsten selbst Intermodulation produzieren und das Messergebnis

verfälschen würden. Dies lässt sich nur durch entsprechend hohe Dämpfung der Signalausgänge zueinander verhindern. Gleichzeitig muss die Signalverknüpfung jedoch in der Lage sein, die Generatorsignale mit möglichst geringer Durchgangsdämpfung auf einen gemeinsamen Ausgang zu leiten. Diese Forderungen erfüllt die im Schaltplan dargestellte Wheatstone-Brücke. Die Entkopplung der Signalen zueinander erreicht 46dB bei einer Durchgangsdämpfung von nur 6dB.

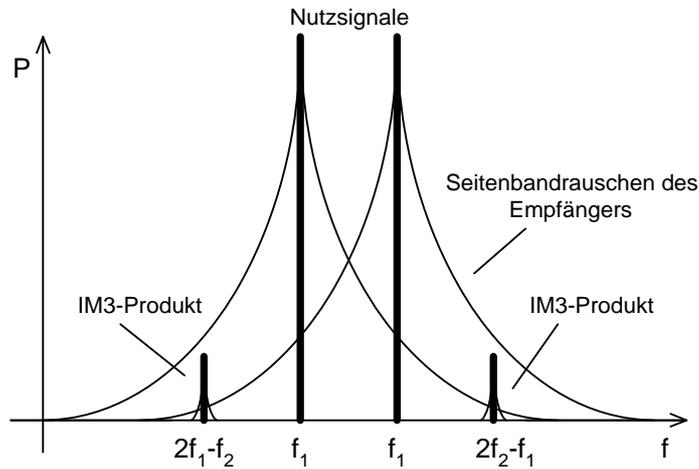


Bild 9: Abdeckung kleiner Signale in geringen Trägerabständen durch das Seitenbandrauschen des Empfängers und /oder Generators

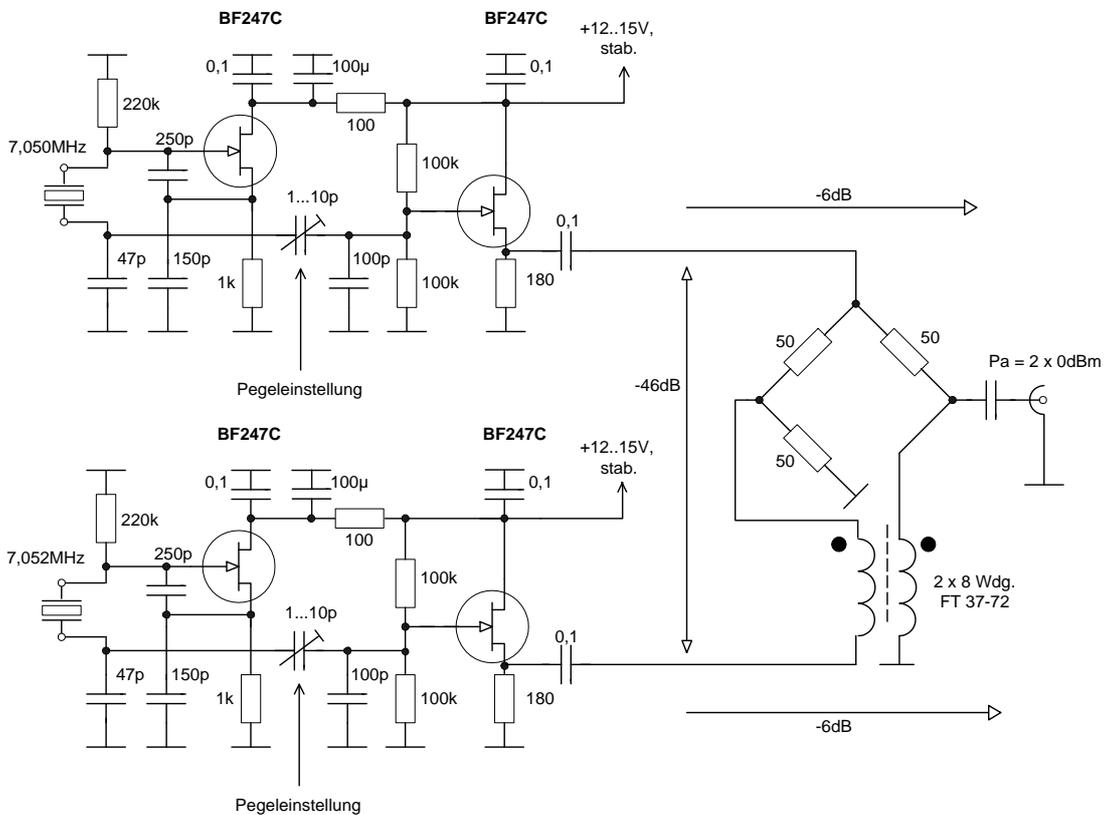
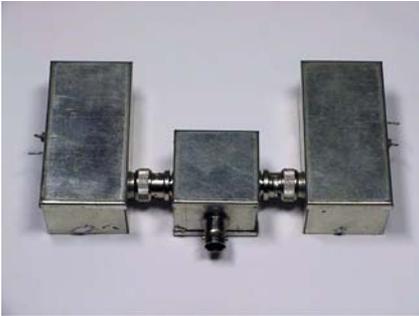
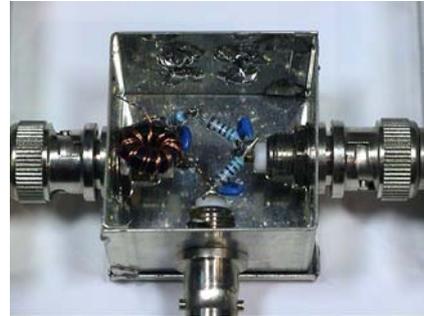


Bild 10: Schaltung eines geeigneten Doppeltongenerator für 1-30 MHz

Doppelton-Generator und Power-Splitter



Wheatstone-Brücke als Power Splitter



Quarze für den Doppelton-Generator



Bild 11: Doppeltongenerator, Wheatstone-Brücke und Quarze für Messungen im 10, 20, 40 und 80m-Band

Berechnungen

- a.) Zunächst muss die Empfindlichkeit (S) des Empfängers ermittelt werden (2,3). Dazu wird in der Betriebsart SSB/CW das Signal eines Messsenders angelegt und so weit verkleinert, bis der mit einem NF-Voltmeter (U_{eff}) am Lautsprecherausgang gemessene Signal/Rausch-Abstand $(S+N)/N = 3\text{dB}$ beträgt. Die ermittelte Empfindlichkeit (=Grundrauschpegel) des Empfängers beträgt im Beispiel $S = -136\text{dBm}$ bei 50-Hz-Filterbandbreite.
- b.) Das S-Meter des zu prüfenden Empfängers muss im ausgewählten Frequenzbereich für einen, definierten Pegel kalibriert werden. Hierzu wird ein -100dBm ($2,23\mu\text{V}$) Signal angelegt und die Zeigerposition des S-Meters markiert. Der KW-Empfänger wird bei diesen Pegel quasi zu einem Messempfänger umfunktioniert, dessen S-Meter den Signalpegel von -100dBm exakt messen kann.
- c.) Anschließend wird der Doppeltongenerator über eine Eichleitung mit dem Eingang des Empfängers verbunden und der Empfänger auf das obere- ($2f_2-f_1$) oder untere- ($2f_1-f_2$) IM_3 -Produkt abgestimmt. Dann vergrößert oder verkleinert man die Ausgangsleistung des Doppelton-Generators so weit, bis die S-Meter-Anzeige genau -100dBm ergibt. Die resultierende Ausgangsleistung (P_e) des Doppeltongenerators wird notiert.

Der Intercept Point 3. Ordnung (IP_3) des Empfängers berechnet sich anschließend nach der Formel:

$$IP_3 = \Delta IM_3 / 2 + P_e$$

mit: ΔIM_3 = Leistungsunterschied zwischen IM_3 -Signal (= -100dBm!) und resultierendem Doppeltongsignal (P_e)

Beträgt die Ausgangsleistung des Doppeltonggenerators z.B. $P_e = -35$ dBm, berechnet sich der IP_3 zu:

$$IP_3 = (100\text{dBm} - 35\text{dBm}) / 2 - 35\text{dBm} = -2,5\text{dBm}$$

Aus bekanntem IP_3 und Empfindlichkeit (S) lässt sich der maximale Eingangspegel (P_{emax}) für intermodulationsfreien Empfang berechnen

$$P_{\text{emax}} = 1/3 (2 \times IP_3 + S) = 1/3 ((2 \times -3\text{dBm}) + (-136\text{dBm})) = -47\text{dBm}$$

$$P_{\text{emax}} = -47\text{dBm} = 1\text{mVeff} = S_9 + 26\text{dB}$$

Treffen zwei Signale der Stärke $S_9 + 26$ dB auf den Eingang des Empfängers, dann entstehen oberhalb und unterhalb dieser beiden Signale im Abstand von 2kHz Intermodulationsprodukte (Störsignale) auf, deren Pegel dem Grundrauschen des Empfängers entsprechen, also schon detektierbar sind. Die Grenze für intermodulationsfreien Empfang ist bei $S_9 + 25$ dB (1mVeff an 50 Ohm) erreicht. Bei Vergrößerung der Nutzsignale, steigen die IM_3 -Störprodukte mit dreifacher Geschwindigkeit an (**Bild 7**).

Der verzerrungsfreie Dynamikbereich des Empfängers berechnet sich aus der Differenz von maximalem Eingangssignal für intermodulationsfreien Empfang (P_{emax}) und der Grenzempfindlichkeit bzw. Grundrauschen (S) des Empfängers.

$$\text{Dynamikbereich} = P_{\text{emax}} - S = -47,3\text{dBm} - (-136\text{dBm}) = 88,7\text{dB}$$

Anmerkung: Durch den Anstieg des Seitenbandrauschens in enger Nachbarschaft starker Signale, ist die Empfindlichkeit und die Dynamik des Empfängers schon von Hause aus eingeschränkt und eine Verschlechterung des IP_3 fällt im praktischen Betrieb dadurch weniger auf, da die Intermodulationsprodukte vom Seitenbandrauschen teilweise zugedeckt werden. Ob jedoch Dynamikverluste von 30dB grundsätzlich vernachlässigbar sind, könnte diskutiert werden.

Literatur:

- (1) Großsignalfestes und empfindliches HF-Eingangsteil, Werner Schnorrenberg, CQ-DL 7, 8/2000
- (2) Messung kritischer Spezifikationen eines HF-Empfängers, Werner Schnorrenberg, CQ-DL 4/93
- (3) Messung nichtlinearer Verzerrungen, Werner Schnorrenberg, QC-DL 5/91

Werner Schnorrenberg
05. Januar 2005