

HF-Zweitonggenerator für IM₃-Messungen an SSB-Endstufen (PA's) und SSB-Empfängern

HF-Zweitongenerator

Ein HF-Zweitonsignal benötigt man für Linearitätsmessungen an SSB-Endstufen und bei Messung der Großsignaleigenschaften von SSB-Empfängern. Hierzu verwendet man entweder zwei HF-Meßsender oder zwei quarzgesteuerte Signalgeneratoren. **Bild 1** zeigt den Aufbau eines geeigneten HF-Zweitongenerators. Die Generatorfrequenzen erzeugen Quarze, welche auf ihrer Serienresonanz schwingen und im Bereich 1-30 MHz beliebig wählbar sind, im Beispiel $f_1=7,055$ MHz und $f_2=7,060$ MHz mit $\Delta f = 5\text{kHz}$ oder $f_1=7,030\text{MHz}$ und $f_2=7,055\text{MHz}$ mit $\Delta f = 25\text{kHz}$.

Die Pegeleinstellung erfolgt über die Trimmer C1, so dass am Ausgang -6 dBm für f_1 und f_2 zur Verfügung stehen. Bei Zusammenführung beider HF-Signale ist darauf zu achten, dass sich die beiden Signalquellen nicht gegenseitig modulieren und die Generatoren dadurch selbst IM-Produkte erzeugen. Dies lässt sich nur durch entsprechend hohe Dämpfung der Signalausgänge zueinander verhindern. Deswegen werden beide Signale in eine Wheatstone-Brücke (7) eingespeist, die aufgrund ihres symmetrischen Aufbaus eine Entkopplung der Generatorausgänge von $>45\text{ dB}$ bewirkt und die Nutzsignale (**Bild 2**) mit 6 dB Durchgangsdämpfung passieren lässt.

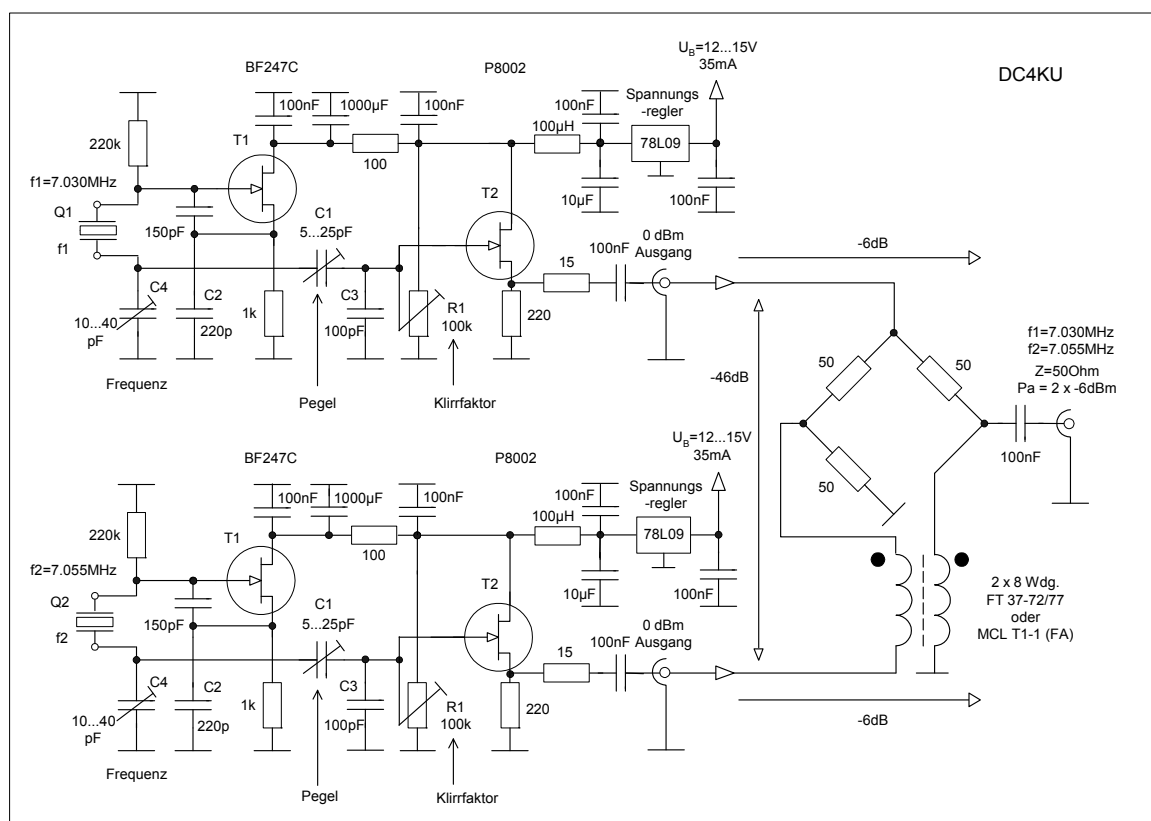


Bild 1: Schaltung eines HF-Zweitongenerators für Messungen im 40m-Band

Die Einstellung auf geringsten Klirrfaktor erfolgt über den Trimmer R1. Im abgeglichenen Zustand beträgt die Oberwellenunterdrückung beider Oszillatoren >50dB (Klirrfaktor <0,3%), so dass kein zusätzliches TP-Filter am Ausgang benötigt wird. **Bild 2** zeigt das Zweitonsignal mit einem HF-Pegel von 2x-6dBm am Ausgang der Wheatstone-Brücke, **Bild 3** den Oberwellenabstand und **Bild 4** zeigt den Testaufbau des HF-Zweitongenerators in drei einzelnen Weißblechgehäusen.

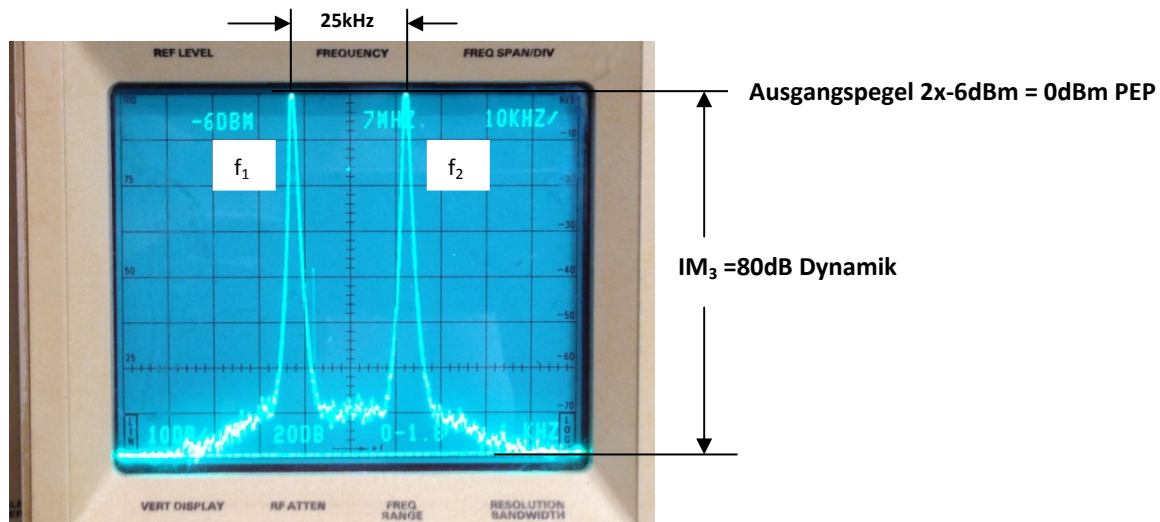


Bild 2: Ausgangssignal des HF-Zweitongenerators mit 2x-6dBm, PEP=0dBm, $f_1=7,030\text{MHz}$ und $f_2=7,055\text{MHz}$. Intermodulationsprodukte (IM_3) sind nicht erkennbar, $IM_3=80\text{dB}$, $IP_3=34\text{dBm}$, bezogen auf PEP: $IP_3=40\text{dBm}$

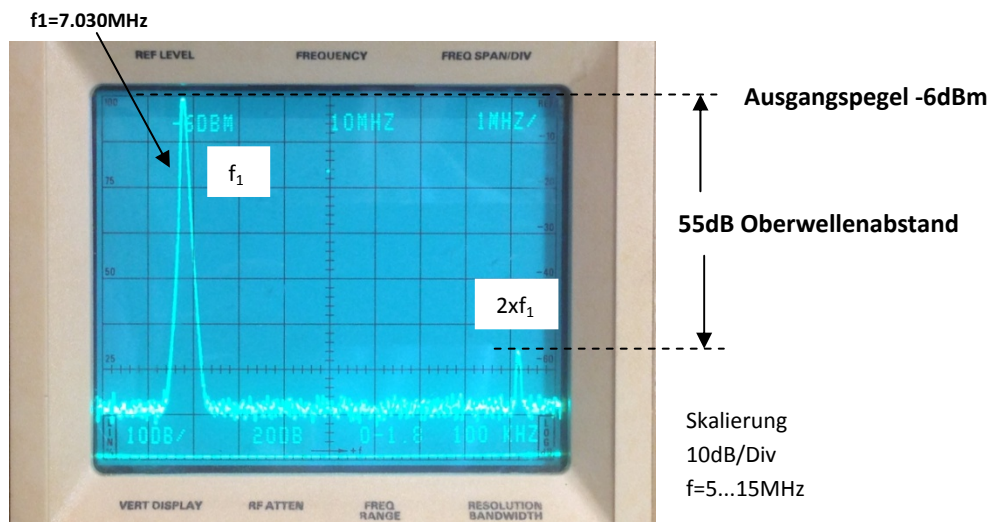


Bild 3: Grundsignal f_1 und die erste Oberwelle (Klirrfaktor) mit 55dBc Abstand

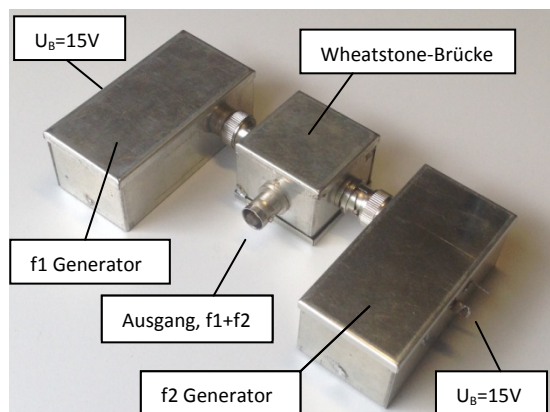


Bild: 4 HF-Zweitongenerator, Testaufbau in einzelnen Weißblechgehäusen mit BNC-Stecker/Buchsen

Hinweis zum Frequenzabstand Δf von f_1 und f_2

Bei der IM-Messung an einer SSB-Sender-Endstufe (PA) kann der Abstand der beiden Signale f_1 und f_2 beliebig groß oder klein zueinander sein, $\Delta f = 5\ldots 50\text{kHz}$, der gewählte Frequenzabstand ändert nichts am resultierenden Intermodulationsabstand. Ganz anders sieht es bei IM-Messungen an SSB-Empfängern aus. Hier sollte der Frequenzabstand nicht kleiner als $\Delta f = 20\ldots 25\text{kHz}$ sein.

Hier der Grund: Wird mit einem Frequenzabstand von kleiner 25kHz gemessen, dann erfolgt schon eine sog. "Inband-Intermodulation" im Empfänger (**s. Bild 15**) und die Ergebnisse der IM-Verzerrungen können sehr viel größer ausfallen, als erwartet. Wenn man jedoch absichtlich und wissentlich eine "Inband-IM-Messung" an seinem Empfänger durchführen möchte, dann kann man auch kleinere Frequenzabstände, wie $\leq 5\text{kHz}$, wählen. Mehr dazu unter "Inband-Intermodulation".

1.) Intermodulationsmessung an einer HF-Endstufe (PA)

Der HF-Zweitongenerator aus **Bild 1** läßt sich für IM-Messungen an HF-Endstufen verwenden. **Bild 5** zeigt den typischen Messaufbau und **Bild 6** die Meßergebnisse am Spektrumanalysator. Im Beispiel wird eine Kurzwellen-PA mit 10 Watt PEP Ausgangsleistung auf Linearität geprüft. Die erforderliche Eingangsleistung der PA beträgt 1mW (0dBm) für 10 Watt (+40dBm) Ausgangsleistung.

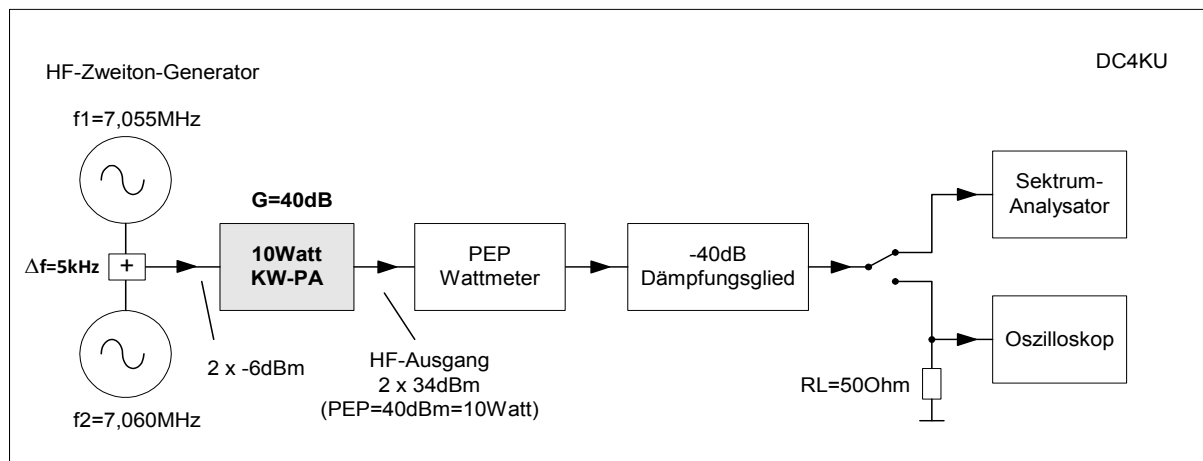


Bild 5: Messaufbau der Intermodulationsmessung an einer 10 Watt KW-Endstufe, wählbares $\Delta f_{1,2} = 5 \dots 50\text{kHz}$

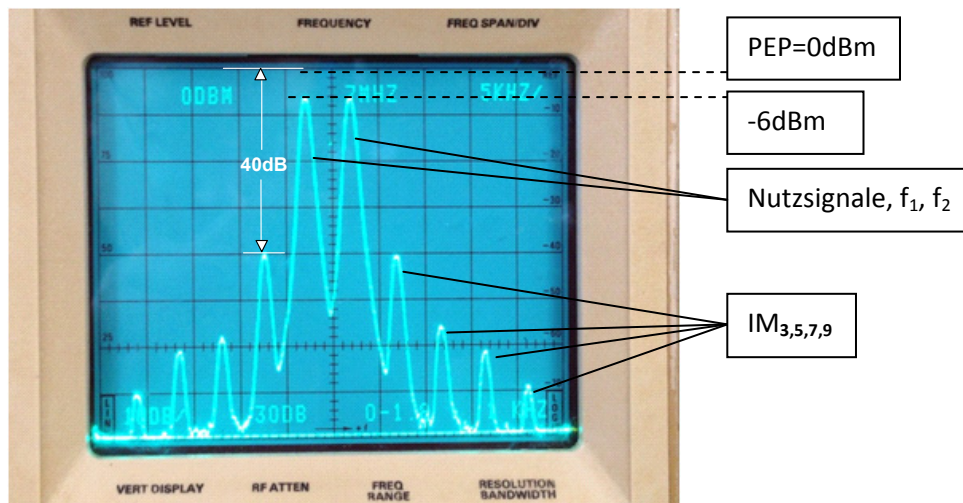


Bild 6: Zweitonspektrum einer 10 Watt-Endstufe, $f_1 = 7,055$ und $f_2 = 7,060\text{MHz}$, $\Delta f = 5\text{kHz}$

Folgende Ergebnisse können vom Schirmbild des Analysators direkt abgelesen werden:

Nutzsignale: f_1, f_2 bei $-6\text{dBm} \rightarrow 2 \times -6\text{dBm} = 0\text{dBm}$ PEP; $0\text{dBm} \times 40\text{dB}$ Gain = 10Watt PEP
 IM_3 : $2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1$ bei $-40\text{dBm} \rightarrow$ Abstand zu Nutzsignalen: **34dB** , Abstand zu PEP 10 Watt: 40dB
 IM_5 : $3f_1 - 2f_2, 3f_2 - 2f_1$ bei -56dBm
 IM_7 : $4f_1 - 3f_2, 4f_2 - 3f_1$ bei -60dBm
 IM_9 : $5f_1 - 4f_2, 5f_2 - 4f_1$ bei -70dBm

Der geringste Abstand zwischen Nutzprodukten f_1 , f_2 und Intermodulationsprodukten (hier IM_3) beträgt 34dB. Demnach besitzt die verwendete Endstufe (PA) bei Volllaussteuerung von 10 Watt PEP einen Intermodulationsabstand IM_3 von 34dB bzw. 40dB bezogen auf PEP.

IM-Produkte gerader Ordnung (f_1+f_2 , f_1-f_2 , $3f_1-f_2$, $2f_1$, $2f_2$..) tauchen nicht auf, da sie weit außerhalb des Frequenzbandes liegen und vom Tiefpassfilter der Endstufe unterdrückt werden. Das HF-Ausgangssignal der PA im Zeitbereich zeigt **Bild 7**. Die Intermodulation ist im Zeitbereich (Scope) nicht zu erkennen. Lediglich die Leistung im Hüllkurvenmaximum (PEP) kann ermittelt werden.

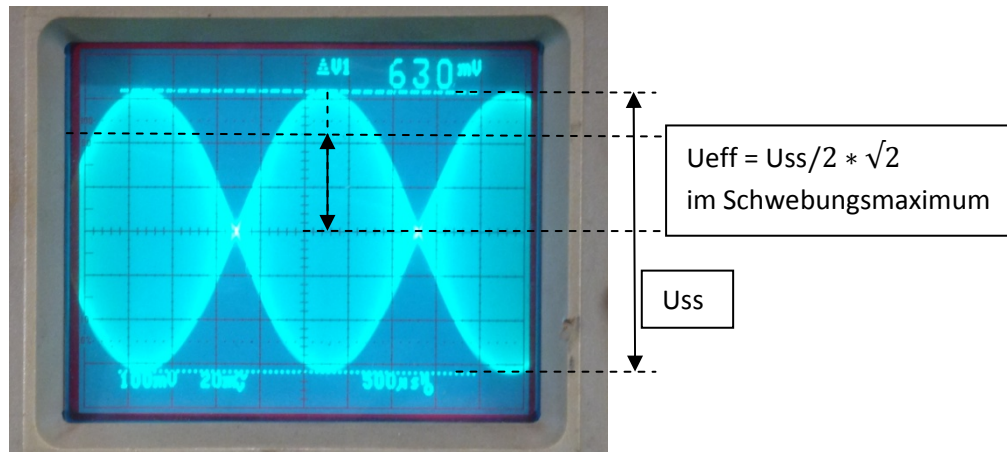


Bild 7: Hüllkurvensignal des SSB-Senders bei Modulation mit einem 2-Ton Signal, Schwebungssignal

Berechnung der Leistung im Schwebungsmaximum (PEP):

$$U_{ss} (\text{Sender}) = U_{ss} (\text{Scope}) \cdot 100 \text{ (40dB Dämpfung)} = 630 \text{ mV} \cdot 100 = 63 \text{ Volt}$$

$$U_{eff} = \frac{U_{ss}}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{63}{2 \cdot 1,414} = 22,3 \text{ Volt}$$

$$P(PEP) = \frac{U_{eff}^2}{R_L} = \frac{497,3}{50} = 9,95 \text{ Watt}$$

Übersteuerung der PA

Bei Pegelvergrößerung von f_1 und f_2 gerät die Endstufe in Kompression und die IM-Produkte steigen schnell an (**Bild 8**). Auch im Zeitbereich ist die Signalbegrenzung gut zu erkennen. Würde das gleiche Signal mit einem Mikrofon erzeugt, würde sich die Stimme rau und gepresst anhören. Das demodulierte NF-Signal ist verzerrt, wird breitbandig und stört die Nachbarkanäle.

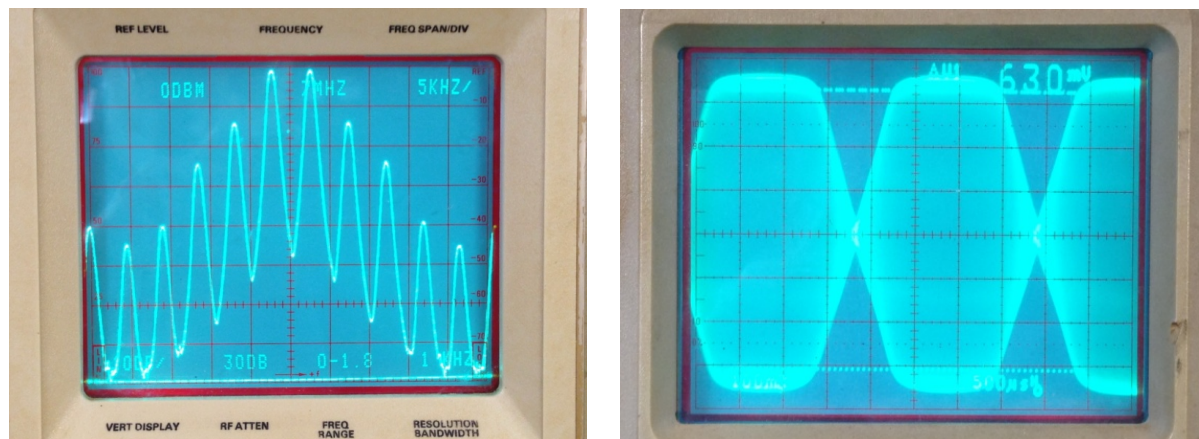


Bild 8: Übersteuerte Endstufe mit starker Intermodulation im Frequenzbereich (links) und deutlich erkennbarer Amplitudenbegrenzung im Zeitbereich (rechts)

2.) Intermodulationsmessung an einem SSB-Empfänger

Der Zweitongenerator aus **Bild 1** ist ebenfalls für Messungen des Großsignalverhaltens von SSB-Empfängern geeignet. Folgende wichtige Eigenschaften werden erfüllt:

- Entkopplung der Generatorausgänge um mindestens 40dB
- hohe Oberwellenunterdrückung der Generatorfrequenzen
- geringes Seitenbandrauschen

Oberwellen

Es ist wichtig, dass die Oberwellen der Generatoren am Ausgang des Zweitong-Generators gut unterdrückt sind. Hier ist der Grund: Nehmen wir an, die Generatoren würden starke Oberwellen produzieren. Wenn die beiden Generatorsignale am Mischereingang anliegen, generiert der Mischer am Ausgang ebenfalls Oberwellen. Wenn die erste Oberwelle der HF-Generatoren mit 180-Grad-Phasendrehung zur ersten Oberwelle am Mischerausgang steht, löschen sich die Produkte aus und resultieren in etwas zu „guten“ IM_3 -Ergebnissen. Auf der anderen Seite, wenn die Harmonischen in Phase liegen, verschlechtern sich die Meßergebnisse um bis zu 3 dB.

Seitenbandrauschen

In Trägenähe 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. Das Seitenbandrauschen (SBN) des Zweitongenerators selbst, muss deswegen sehr gering sein. Die Quarzoszillatoren erfüllen diese Anforderung.

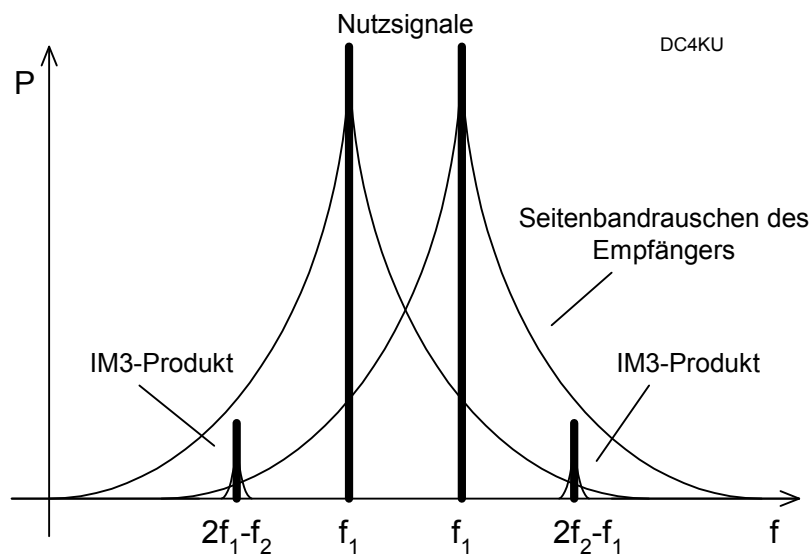


Bild 9: Abdeckung kleiner Signale in geringen Trägerabständen durch das Seitenbandrauschen der Generatoren und/oder des Empfänger-Überlagerungsoszillators (reziprokes Mischen)

Messung der Intermodulationsfestigkeit eines SSB-Empfängers

Bei der Messung des IP_3 verwendet man einfachsten den Empfänger selbst als "Meßgerät". Dazu benötigt der Empfänger aber ein in "dB" geeichtes "S-Meter", das zumindest über 80dB pegelgenau anzeigen muß. Da aber nur wenige Empfänger über kalibrierte S-Meter verfügen, wird später noch ein anderes Messverfahren beschrieben.

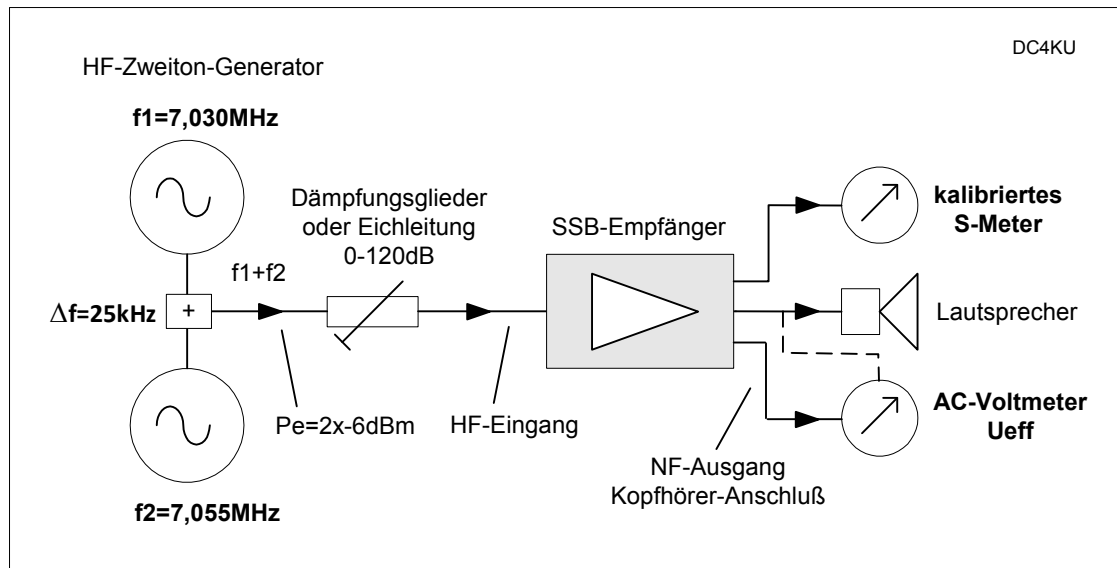


Bild 10: Messaufbau für IM-Messung an einem SSB-Empfänger, $f_1 = 7.030\text{MHz}$, $f_2 = 7.055\text{MHz}$, $\Delta f_{1,2} = 25\text{kHz}$

IP₃-Messung über ein in dB geeichtetes S-Meter

Die Messung des IP₃ beginnt bei $P_e = 2 \times -6 \text{ dBm}$ für f_1 und f_2 nach Messaufbau in **Bild 10**. Das S-Meter zeigt -6 dBm bei f_1 und f_2 an. Bei den unerwünschten IM₃-Produkten $2 \times f_1 - f_2$ und $2 \times f_2 - f_1$, also jeweils 25 kHz oberhalb und unterhalb von f_1 und f_2 , werden die Pegel (P_{IM_3}) abgelesen und notiert. Die gleiche Messung wird mit den Generatorpegeln $P_e = -12 \text{ dBm}$ und $P_e = -18 \text{ dBm}$ durchgeführt.

Die Meßergebnisse an meinem SSB-Empfänger waren:

Eingangssignal (P_e)	S-Meter Messwert (P_{IM_3})	Ergebnis (IP ₃)
• $P_e = 2 \times -6 \text{ dBm}$	$P_{\text{IM}_3} = -70 \text{ dBm}$	-> $\text{IP}_3 = 26 \text{ dBm}$
• $P_e = 2 \times -12 \text{ dBm}$	$P_{\text{IM}_3} = -87 \text{ dBm}$	-> $\text{IP}_3 = 25,5 \text{ dBm}$
• $P_e = 2 \times -18 \text{ dBm}$	$P_{\text{IM}_3} = -106 \text{ dBm}$	-> $\text{IP}_3 = 26 \text{ dBm}$

Berechnung des IP₃:

$$\text{IP}_3 = \Delta \text{IM}_3 / 2 + P_e \quad \text{mit} \quad \Delta \text{IM}_3 = P_e - P_{\text{IM}_3}$$

Bei $P_e = 2 \times -6 \text{ dBm}$: $P_{\text{IM}_3} = -70 \text{ dBm}$ (S-Meter Anzeige)

$$\Delta \text{IM}_3 = -6 \text{ dBm} - (-70 \text{ dBm}) = 64 \text{ dB}$$

$$\text{IP}_3 = 64 \text{ dB} / 2 - 6 \text{ dBm} = +26 \text{ dBm}$$

Der IP₃ sollte bei drei unterschiedlichen Pegeln gemessen werden, wobei die IP₃-Ergebnisse um nicht mehr als 1 bis 2 dB voneinander abweichen sollten.

Die Meßergebnisse in grafische Darstellung zeigt **Bild 11**. Hierbei wurden die Übertragungs- und die IP₃-Kennlinie soweit zu größeren Pegeln hin verlängert, bis sie sich schneiden. Dieser theoretische Schnittpunkt wird als 3. Order Intercept Point (IP₃) bezeichnet. Deutlich zu erkennen ist, dass die Störprodukte dreimal schneller ansteigen als die Nutzprodukte. Darin liegt ein Hauptproblem von Intermodulationsstörungen in der Nachrichtentechnik. Durch Bandpässe und Filter im Eingang des Empfängers lassen sich IM₃-Störungen nicht unterdrücken, da sie zu dicht bei den Nutzsignalen entstehen.

Hinweis: Bei Eingangsleistungen von $2 \times -6 \text{ dBm}$ können schon einige Empfänger in die Kompression geraten und die Meßergebnisse werden dann zwangsläufig falsch. Ist die Großsignalfestigkeit des zu untersuchende Empfängers nicht bekannt, sollte man mit kleineren Leistungen beginnen, von $P_e = 2 \times -12 \text{ dBm}$ oder $2 \times -18 \text{ dBm}$.

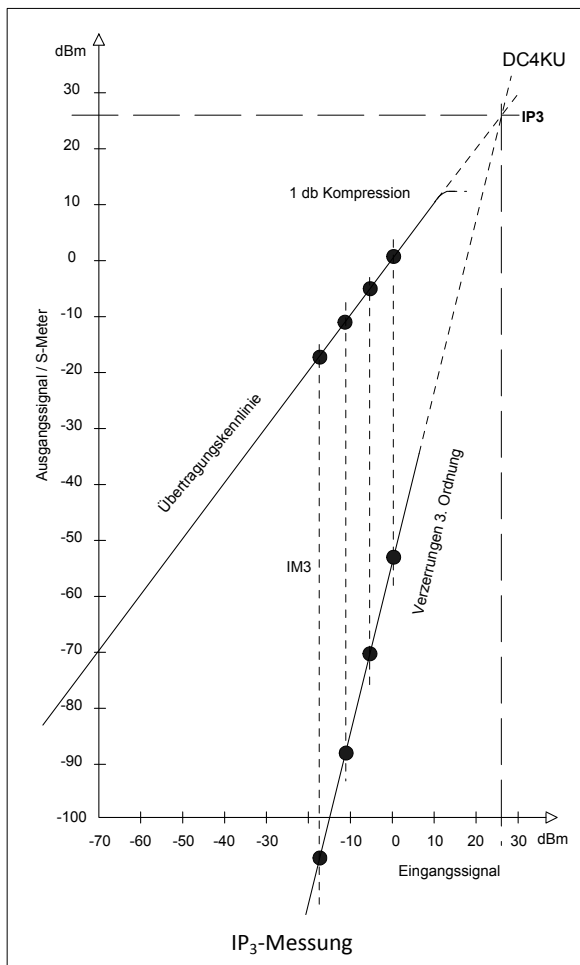


Bild 11: Übertragungskurve und IP_3 -Messkurve

IM_3 -Messung über den NF-Ausgang des Empfängers, "3dB-Methode"

Die IM_3 -Messung funktioniert auch ohne ein "kalibriertes S-Meter". Hierzu muß zunächst die Empfindlichkeit (S) des KW-Empfängers ermittelt werden (**Bild 12**). Dazu messen wir zunächst den "Grundrauschpegel" des Empfängers am Kopfhörer- oder Lautsprecherausgang (der Lautsprecher wird hierbei abgeschaltet) mit einem empfindlichen NF-Voltmeter (Effektivwert). Die NF-Ausgangsspannung (das Grundrauschen) wird mit Hilfe des Lautstärkereglers auf einen Spannungswert von z.B. $200 \text{ mV}_{\text{eff}}$ (Wert notieren!) eingestellt. Anschließend den SSB-Empfänger ($B=2,4 \text{ kHz}$) mit dem 2-Ton-Generator verbinden, auf das Nutzsignal f_1 oder f_2 abstimmen und auf einen Überlagerungston von ca. 1 kHz abgleichen. Der nicht genutzte Kanal kann abgeschaltet werden. Dann die Dämpfung zwischen Generator und Empfängereingang soweit erhöhen, bis die Ausgangsspannung am Voltmeter nur noch um den Faktor 1,414 ($\approx 3 \text{ dB}$) gegenüber dem zuvor gemessenen Grundrauschpegel ansteigt, von $0,2 \text{ V}$ auf $0,2828 \text{ V}$ oder über eine logarithmische Skala auf $+3 \text{ dB}$. Die jetzt eingespeiste Leistung entspricht dem Grundrauschpegel des Empfängers. Im Beispiel entstand am Empfängerausgang ein $(S+N)/N=3 \text{ dB}$ bei $P_e = -128 \text{ dBm}$ (-6 dBm Generatorpegel plus 122 dB Dämpfung = -128 dBm).

Empfindlichkeit (S) = -128 dBm , bezogen auf SSB-Bandbreite von $2,4 \text{ kHz}$

Das Grundrauschen ist als Maß der Empfindlichkeit des Empfängers definiert. Legt man ein Signal an den Empfängereingang, dessen Pegel das Empfängerrauschen (den NF-Ausgangspegel) um 3dB anhebt, dann entspricht die Leistung des Signals nach $(S+N)/N=2$ der Leistung des Grundrauschens und damit der Empfindlichkeit des Empfängers. Als Referenzsignal bei der Messung dient uns das -6dBm-Signal des 2-Ton-Generators.

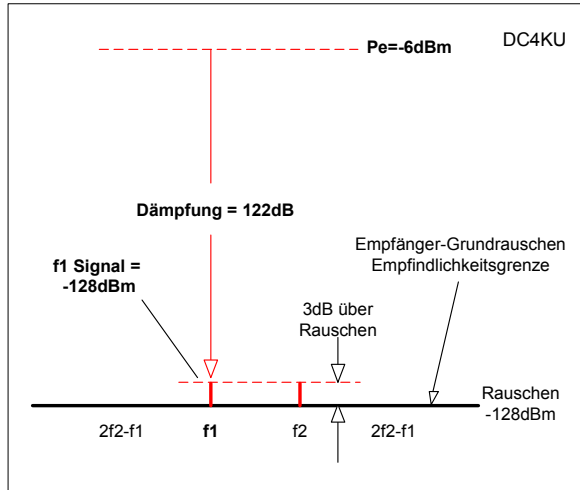
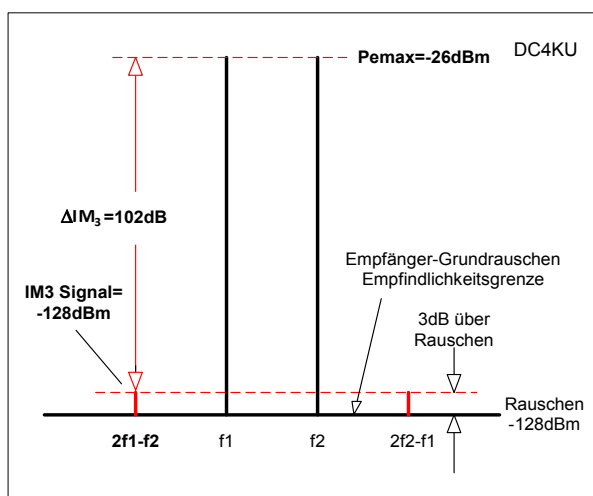


Bild 12: Messung der Empfindlichkeit (S) des Empfängers in spektraler Darstellung

Messung des maximalen Pegels (P_{emax}) für Intermodulationsfreien Empfang

Nach Berechnung der Empfindlichkeit, wird die maximale Größe (P_{emax}) der Nutzsignale f_1, f_2 ermittelt, bei der noch ein IM-freier Empfang möglich ist. Die Messung läuft genauso ab, wie die Messung zuvor, nur das jetzt die Pegel der IM_3 -Produkte gemessen werden. Dazu den Empfänger auf das obere ($2f_1-f_2$) oder untere ($2f_2-f_1$) IM_3 -Produkt abstimmen und die Leistung des 2-Ton Generators (ausgehend von -6dBm) so weit verkleinern, bis sich am Voltmeter wieder ein Signal/Rausch-Abstand von 3dB, Spannungsfaktor 1,414, ergibt. Im Beispiel entstanden bei $P_{\text{emax}} = 2 \times -26\text{dBm}$ (-6dBm Generator plus 20dB Dämpfung) IM_3 -Störsignale, die der Größe des Empfänger-Rauschpegels entsprachen.

$P_{\text{emax}} = 2 \times -26\text{dBm}$, maximale Eingangsleistungen für IM-freien Empfang, am S-Meter: ca. S9+50dB



Hinweis: Bei dieser Messung muß der Intermodulationsabstand des 2-Ton-Generators selbst >100dB sein!

Bild 13: Messung von P_{emax} für den max. IM-freien Dynamikbereich des Receivers in spektraler Darstellung

Zwei Signale von $P_e = -26\text{dBm}$ erzeugen Intermodulationsprodukte 3. Ordnung in einem Abstand von 102dB zu den Nutzprodukten. Die entstehenden IM_3 -Produkte bei $2f_1-f_2$ und $2f_2-f_1$ liegen beide 3dB

über dem Grundrauschen des Empfängers und entsprechen damit genau der Leistung des Grundrauschens bzw. der Empfindlichkeit des Empfängers von $S = -128\text{dBm}$.

Intermodulationsabstand, ΔIM_3

Aus der Differenz der ermittelten Werte von max. Eingangsleistung P_{emax} und Empfindlichkeit S berechnet sich ein IM_3 -Abstand von

$$\Delta IM_3 = P_{\text{emax}} - S = -26\text{dBm} - (-128\text{dBm}) = 102\text{dB}$$

Dynamik und Intercept-Point

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.

Aus den gewonnenen Messwerten berechnet sich eine max. IM-freie Dynamik des Empfängers von

$$\text{Dynamik} = P_{\text{emax}} - S = 102\text{dB}$$

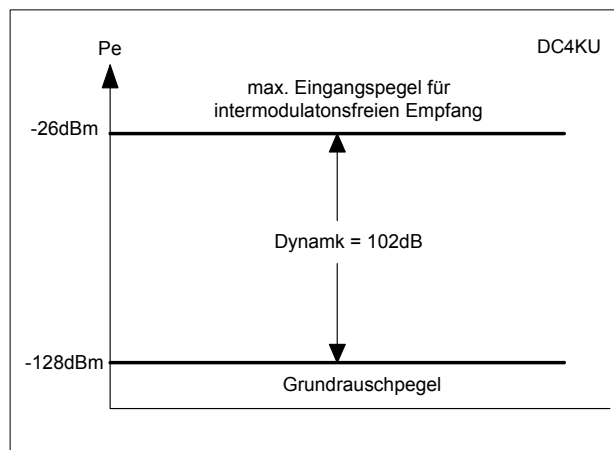


Bild 14: Verzerrungsfreier Dynamikbereich des Empfängers

Der Intercept Point 3. Ordnung, der IP_3 des Empfängers, berechnet sich daraus zu

$$IP_3 = \Delta IM_3 / 2 + P_{\text{emax}}$$

$$IP_3 = 102\text{dB}/2 + (-26\text{dBm}) = +25\text{dBm}$$

Rauschzahl

Nach Ermittlung der Grenzempfindlichkeit (S) kann die Rauschzahl (NF) des Empfängers berechnet werden. Dazu muss die Rauschbandbreite des eingesetzten Selektionsfilters bekannt sein. Die -6dB Bandbreite eines SSB-Filters beträgt im Regelfall 2,4kHz. Bezieht man nun die Empfindlichkeit (S) des Empfängers auf die theoretische Rauschbandbreite von 1 Hz, erhöht sich die Empfindlichkeit um den Faktor 2400 bzw. logarithmisch um den Wert $10\log 2400 = 34\text{dB}$.

$$S = -128\text{dBm} - 34\text{dB} = -162\text{dBm/Hz}, \text{ Empfindlichkeit bezogen auf 1Hz}$$

Der Grenzwert der Empfindlichkeit ist bekanntlich -174dBm/Hz . Die Differenz beider Werte ergibt die Rauschzahl (Noise Figure) des Empfängers

$$\text{Rauschzahl} = NF \text{ (Noise Figure)} = -162\text{dBm/Hz} - (-174\text{dBm/Hz}) = 12\text{dB}$$

Mit anderen Worten: Der Signal/Rausch-Abstand (S/N) eines empfangenen Signals verschlechtert sich um 12dB zwischen Eingang und Ausgang des Empfängers.

"Inband-Intermodulation"

Der Zweitongenerator in **Bild 5** hat einen f_1 zu f_2 Frequenzabstand von $\Delta f=5\text{kHz}$ und in **Bild 10** einen Frequenzabstand von $\Delta f=25\text{kHz}$. Die Wahl anderer Quarzfrequenzen ist jederzeit möglich. Die Frage die sich stellt ist, wie groß oder wie klein darf oder sollte der Frequenzabstand beider Töne bei Messungen an einem SSB-Empfänger eigentlich sein? 5kHz, 10kHz, 20kHz, 25kHz oder 50kHz oder spielt das keine Rolle?

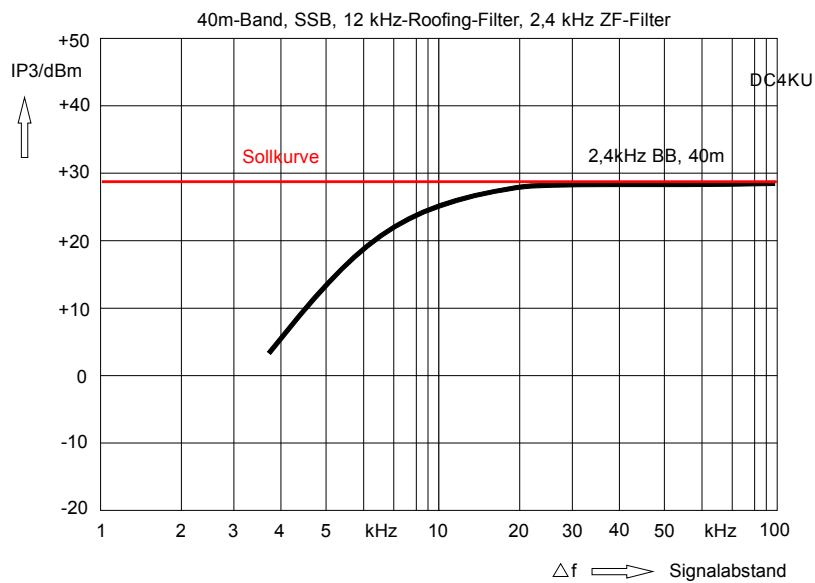


Bild 15: IP_3 eines KW-Empfängers in Abhängigkeit vom Signalabstand f_1, f_2

Leider ist dem nicht so. Bei geringen Frequenzabständen von nur $<15\text{kHz}$ unterschreiten beide Signale die Bandbreite des hinter dem 1. Mischers angebrachten Quarzfilters (Roofing-Filter mit 6...15kHz Bandbreite) und dadurch sinkt die Intermodulationsfestigkeit meist deutlich ab, weil nunmehr der 2. Umsetzer (Mischer) für die IM-Festigkeit verantwortlich ist. Wurde der 2. Umsetzer nicht mit der gleichen IM-Festigkeit wie die des 1. Umsetzers ausgestattet, verschlechtert sich die Großsignalfestigkeit des Empfängers zwangsläufig. Die in der 2. ZF entstehende Intermodulation bezeichnet man als „In-Band Intermodulation“ (**Bild 16**), (5).

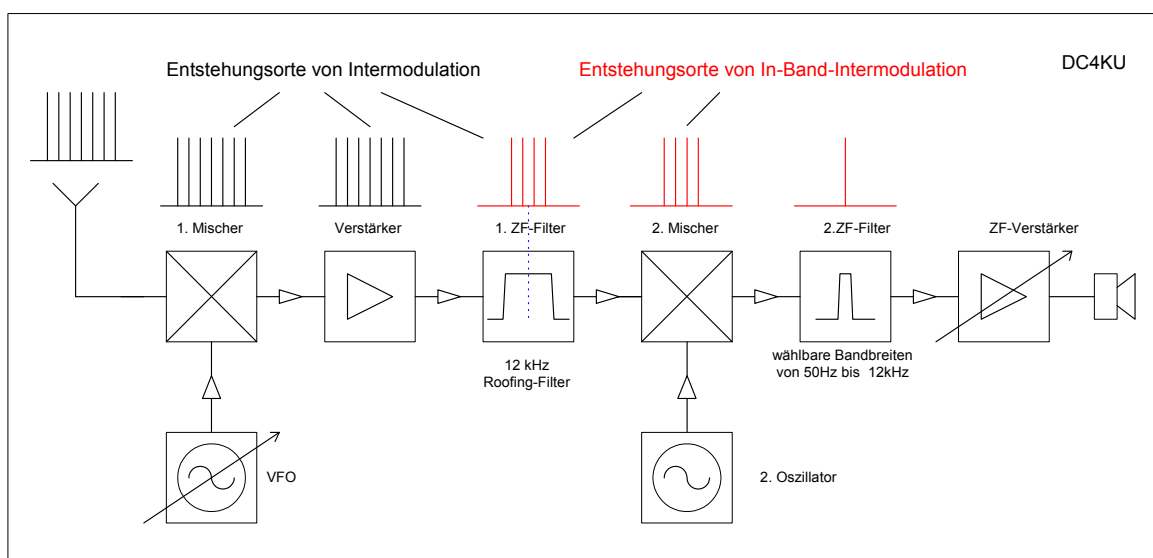


Bild 16: Doppelsuperhet mit Vorselektion in der 1.ZF und endgültiger Selektion der in 2. ZF/DSP

Daraus folgt: Bei dicht zusammen liegenden Signalfrequenzen von $<15\text{kHz}$ kann das Ergebnis der IM_3 -Messung an einem SSB-Empfänger sehr viel schlechter ausfallen, als bei größeren Abständen von $25\ldots 50\text{kHz}$. Für eine "Standard" IM_3 -Messung empfehle ich deshalb, nur Frequenzen zu verwenden, deren Abstand zueinander $20\ldots 50\text{kHz}$ betragen. Für das 40m-Band z.B.: $f_1=7.030\text{MHz}$ und $f_2=7.055\text{MHz}$, mit einem Δf von 25kHz .

Anmerkung: Bei digitalen, direktabtastenden SDR-Receiver spielt der Frequenzabstand Δf keine Rolle, der IM -Abstand ist immer gleich. Bei sehr geringen Frequenzabständen begrenzt jedoch das Seitenbandrauschen der Oszillatoren (reziproke Mischen) die Auflösung (Dynamik).

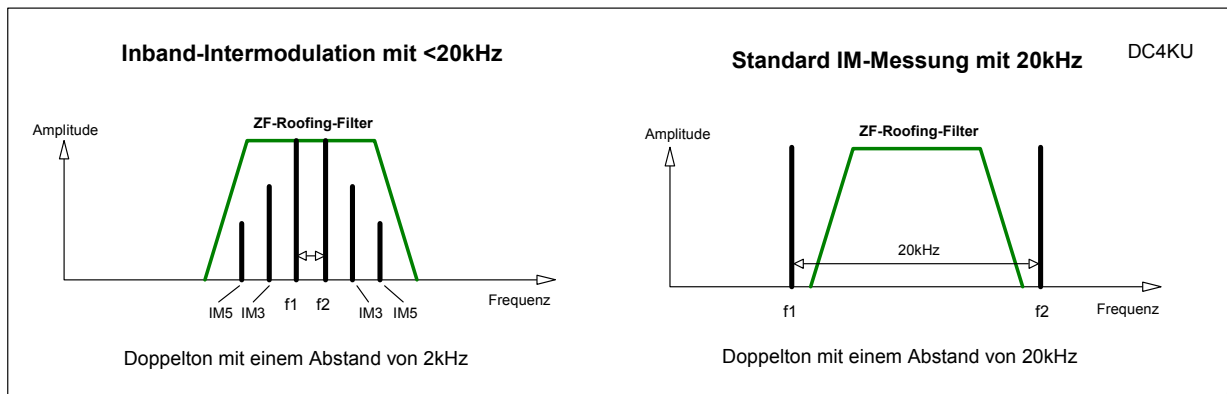


Bild 17: IM-Messung mit f_1, f_2 Signalabstand $\Delta f=2\text{kHz}$ (links) und $\Delta f=20\text{kHz}$ (rechts)

In-Band Intermodulationsmessung von SSB-Sendern

Bei SSB-Sendern kann mit zwei dicht beieinander liegenden NF-Ton-Signalen von z.B. $f_1=1075\text{Hz}$ und $f_2=1500\text{Hz}$, $\Delta f=425\text{Hz}$ ganz bewusst die Inband-Intermodulation gemessen werden und hierdurch z.B. ein falsch eingestellter und für die Intermodulation verantwortlicher defekter Mikrofonverstärker (Klipper, Begrenzer) oder fehlerhafter 1. Mischer erfasst und lokalisiert werden. Bei weit auseinander liegenden NF-Doppeltönen (500Hz , 2000Hz) können Intermodulationsverzerrungen im Mikrofonverstärker, NF-Kompressor und 1. Mischer nicht erfasst werden!

3.) Aufbau und Abgleich des HF-Zweitongenerators

Abgleich auf geringsten Klirrfaktor

Die verwendeten, klassischen Colpitts-Oszillatoren wurden an zwei Stellen geringfügig geändert, um einen geringeren Klirrfaktor zu erreichen. Der Schwingkreis-Kondensator C2 an T1 von Source auf Masse wurde von ursprünglich 150pF auf 1nF erhöht, damit der der Quarz weniger belastet wird und die Amplitude nicht in Begrenzung geht. Weiterhin wird das Signal direkt am Quarz abgegriffen und nicht - wie sonst üblich - am Source von T1. Falls der Oszillator nicht abschwinge sollte, muß C4 etwas vergrößert bzw. C2 etwas verkleinert werden. Bei Quarzfrequenzen oberhalb 10MHz sollte C2 auf 220pF verkleinert und C3 entfernt werden.

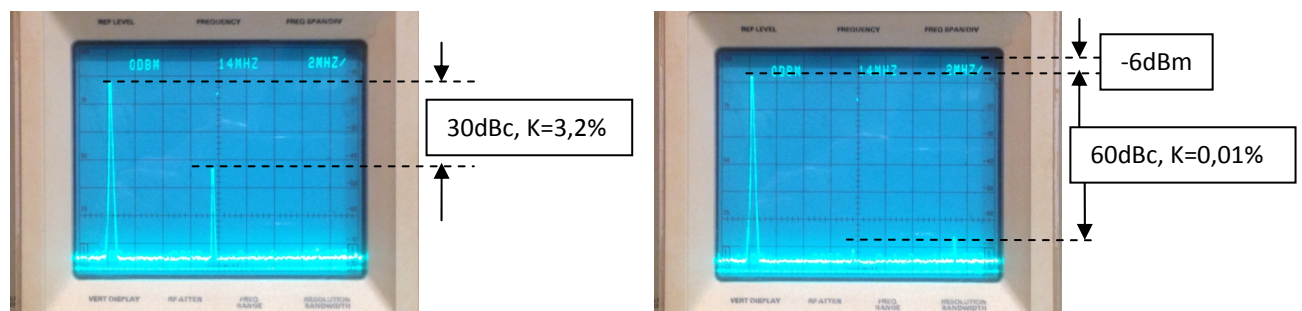


Bild 18: Abgleich von f_1, f_2 auf geringsten Klirrfaktor, links ohne Abgleich, rechts nach Abgleich mit R1

Die Wheatstone-Brücke (RF-Power-Splitter/Combiner) enthält keine Besonderheiten, die Entkopplung der Generatoren zueinander beträgt >40dB. Die optionale Schottkydiode (D), die vom Gate T1 nach Masse geht, dient zur Amplitudenregelung, indem sie bei anwachsender Amplitude den Kondensator am Gate negativ auflädt und dadurch den Arbeitspunkt des FET's in Bereiche niedriger Steilheit, d.h. in Richtung Pinch-Off-Spannung steuert. Der Einsatz der Diode ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Je nach Arbeitspunkt des FET's, der erheblichen Streuungen unterliegt, kann sich das Oszillatorrauschen (SBN) durch den Einsatz der Diode verschlechtern. Im Zweifelsfall sollte man die Diode weglassen, in meiner Versuchsschaltung ist sie nicht eingebaut.

Tipp: Der Klirrfaktor der Generatoren läßt sich auch ohne zusätzliche Messgeräte ermitteln, indem man lediglich den eigenen KW-Transceiver als Messgerät verwendet, das S-Meter muß für diese Messung allerdings kalibriert sein. Zunächst misst man den Pegel des Grundsignals bei z.B. -20dBm mit dem S-Meter des KW-Transceivers. Dann gleicht man den Empfänger auf die erste Harmonische des Grundsignals $f=7,030\text{MHz} \times 2 = 14,060\text{MHz}$ ab und misst dort den Pegel. Die Differenz am S-Meter sollte im abgeglichenen Zustand 55...60dB betragen. Ist der Wert kleiner, dann stellt man den Oberwellenabstand mit R1 auf seinen maximalen Wert ein (kleinste S-Meter Anzeige). Diese Messung für beide Oszillatoren separat durchführen.

Abgleich auf eine Ausgangsleistung von z.B. 2x-6dBm

Wie stellt man die Ausgangspegel des Zweitongenerators auf genau 2x-6dBm ein, wenn man weder über ein HF-Leistungsmessgerät, ein kalibriertes S-Meter noch einen Spektrumanalysator verfügt? Am einfachsten funktioniert das mit einem Oszilloskop (**Bild 19**).

Abgleich: Oszillator f1 einschalten (f2 ausschalten) und den Ausgang hinter der Wheatstone-Brücke mit 50 Ohm abschließen. Anschließend mit dem hochohmigen Tastkopf die Spannung am Ausgang messen. Die Amplitude wird mit C1 eingestellt. Ein Pegel von -6dBm entspricht einer Spannung von 112mVeff bzw. 318mVss. Wenn diese Spannung (Uss) am Scope angezeigt wird, beträgt die Ausgangsleistung genau -6dBm. Anschließend Oszillator f2 ebenso abgleichen.

Spannung und Leistung des 1-Ton-Signals:

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{ss}}}{2 * \sqrt{2}} = \frac{318\text{mV}}{2 * \sqrt{2}} = 112\text{mV}$$

$$P = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R} = \frac{0,112\text{V}^2}{500\text{ohm}} = 0,25\text{mW} = -6\text{dBm}$$

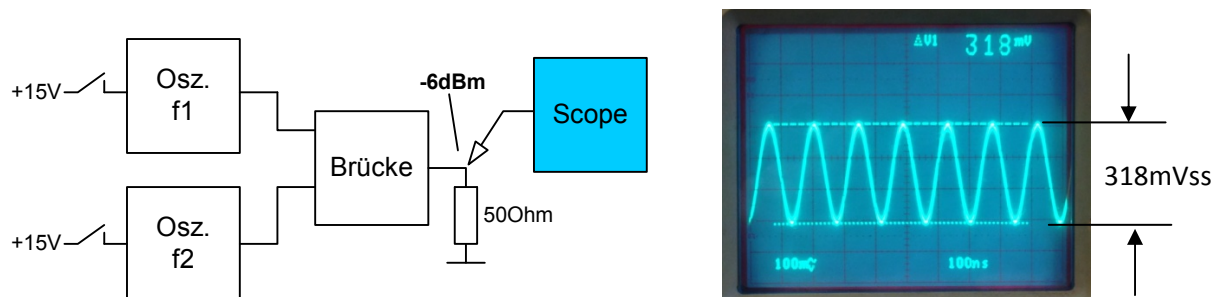


Bild 19: Ausgangsleistung von f1, f2 auf -6dBm = 318mVss einstellen, mit Hilfe eines Scopes

Nach erfolgreichem Abgleich werden beide Signale auf den Scope gegeben und es entsteht ein sog. "Schwebungssignal" entsprechen **Bild 20**. Beide Signale zusammen erzeugen eine Spitzenspannung von 636mVss und im Null-Durchgang muß ein scharfes X entstehen. Stimmen die Messkurve nicht, müssen die Amplituden nachgestellt werden. Damit ist der Abgleich beendet.

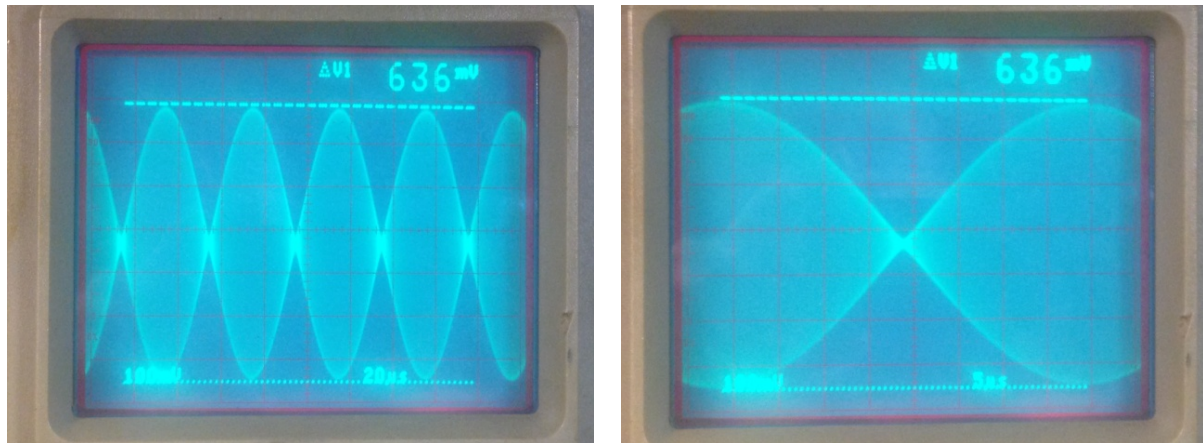


Bild 20: Ausgangssignal beider Signale im Zeitbereich, Leistung 2x-6dBm

Spannung und Leistung des 2-Ton-Signals:

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{ss}}}{2 * \sqrt{2}} = \frac{636 \text{ mV}}{2 * 1,414} = 225 \text{ mV}$$

$$P(\text{PEP}) = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R_L} = \frac{0,225 \text{ V}^2}{500 \Omega} = 0,001 \text{ Watt} = 1 \text{ mW} = 0 \text{ dBm}$$

Das intermodulationsfreie HF-Doppeltonsignal am Spektrumanalysator zeigt **Bild 21** und gemessen über einen simplen SDR-Receiver **Bild 22**.

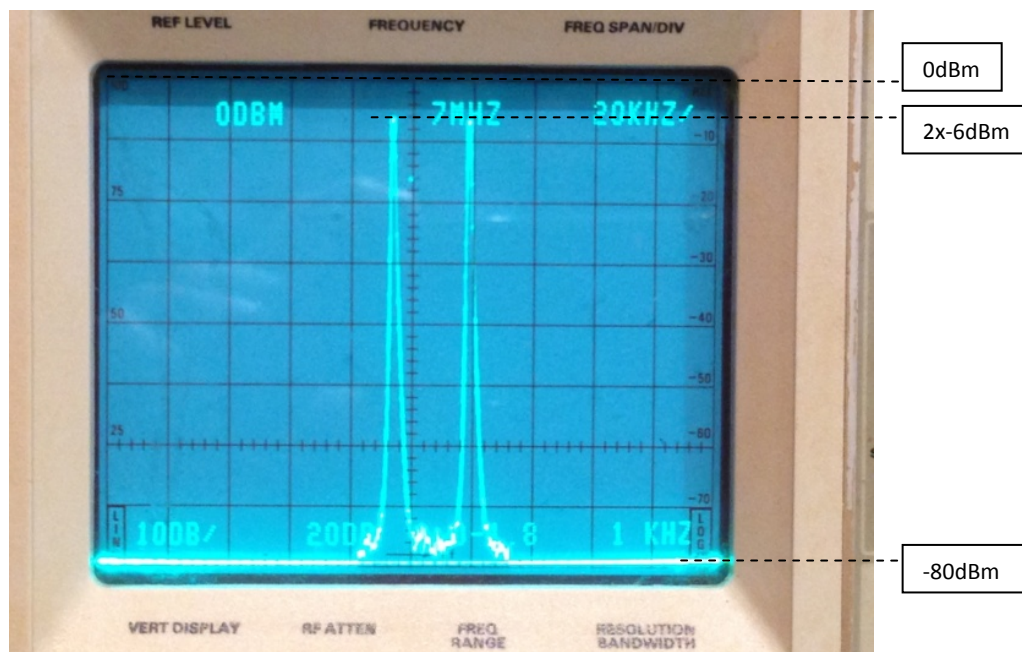


Bild 21: HF-Doppeltonsignal am Spektrumanalysator

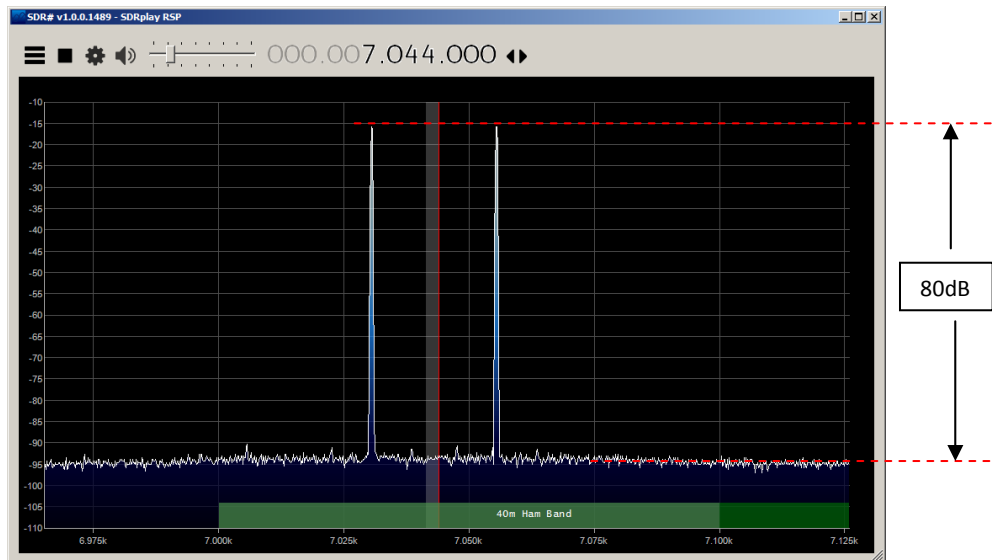


Bild 22: HF-Doppeltonsignal am SDR-Receiver SDRplay RSP

Dämpfungsglieder

Wer über keine HF-Eichleitung von 0...120dB verfügt, verwendet einfach eine Reihe von 50 Ohm-Dämpfungsgliedern, mit 20dB, 10dB, 14dB, 6dB und 3dB. Es ist zwar etwas unhandlich damit die Dämpfung einzustellen, aber es funktioniert genauso gut, wie mit einer Eichleitung. Fünf Glieder à 20dB ergeben schon 100dB Dämpfung. FUNKAMATEUR liefert ab Lager BNC-Dämpfungsglieder für 3, 6, 10, 20 und 30dB.

Bauteile

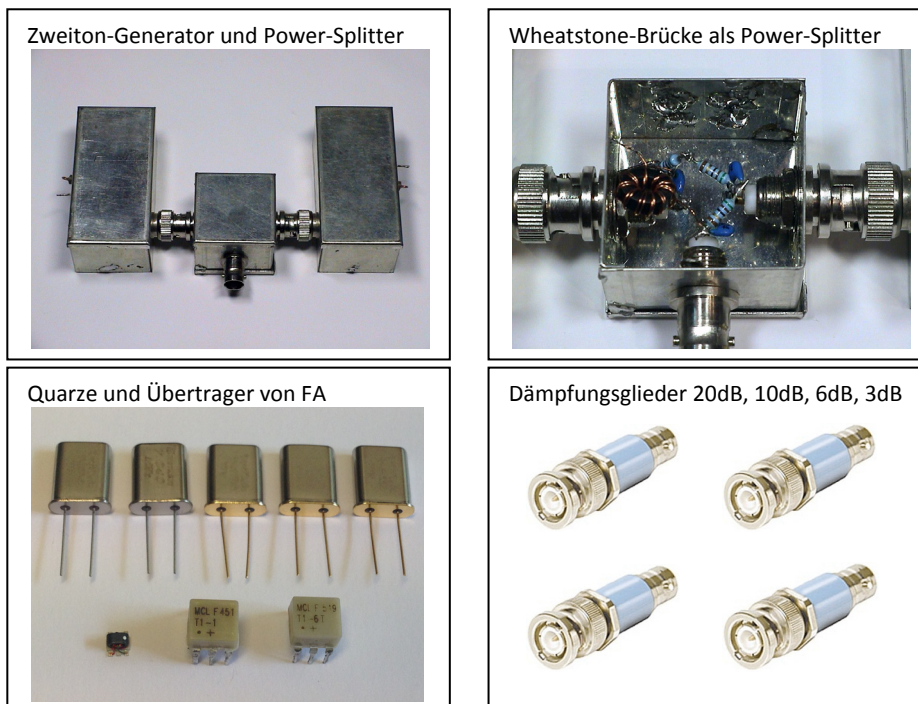


Bild 23: HF-Zweitongenerator mit Wheatstone-Brücke (oben), verschiedene Quarze, Breitbandübertrager (MCL) und Dämpfungsglieder (FA) (unten)

Literatur

(1) Intermodulations-Messgenerator

Josef Becker, DJ8IL
CQ-DL 12-2007

(2) HF-Zweitongenerator

http://funkamateure-dresden-ov-s06.de/index.php?article_id=235&clang=0

(3) Entwurf von Quarzoszillatoren

Bernd Neubig, DK1AG
http://www.qsl.net/dk1ag/ukw1979_d.pdf

(4) Intermodulationsmessplatz für hohe Interzeptpunkte

Rob's Web, Ulrich Graf, DK4SX
<http://www.robkalmeijer.nl/techniek/electronica/radiotechniek/hambladen/fa/2003/page1141/index.html>

(5) Inband IMD Immunity Testing

Adam Farson, AB4OJ
<http://www.ab4oj.com/test/imdtest/main.html>

(6) Oszillatoren, ZHAW

https://home.zhaw.ch/kunr/ASV/scripts/ASV%20FS2009%20Oszillatoren_2009.pdf

(7) RF Power-Splitter & Power-Combiner

W. Schnorrenberg, DC4KU
http://www.dc4ku.darc.de/Power_Splitter.pdf

Werner Schnorrenberg
DC4KU, dc4ku@darc.de
13.06.2016

Rev.: 17.07.2018