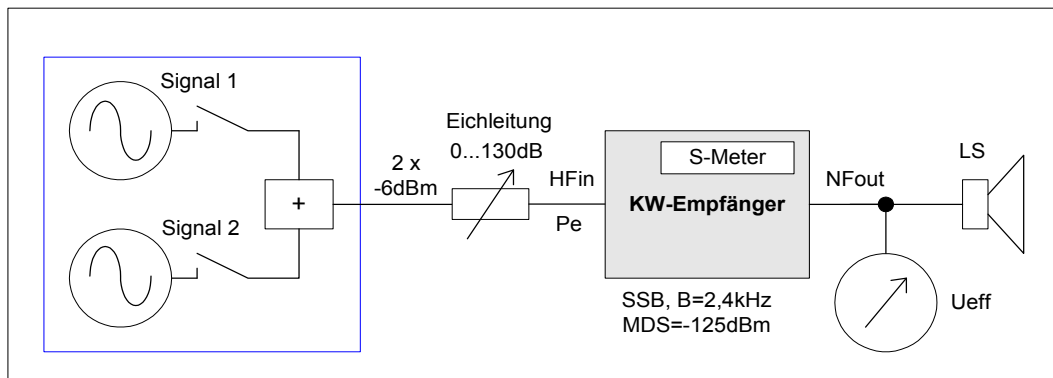


## Messungen mit dem HF-Zweitongenerator FA-2-HF von FA



**Bild 1: HF-Zweitongenerator von FUNKAMATEUR**

Der 2-Tongenerator eignet sich für Qualitätsmessungen an analogen- und digitalen Transceivern. Bild 2 zeigt den HF-Zweitongenerator in einem Messaufbau zur Ermittlung von Empfindlichkeit, IM3, Dynamik, RMDR und Seitenbandrauschen eines KW-Empfängers.



**Bild 2: HF 2-Ton-Generator für Empfänger messungen,  $f_1=7,030\text{MHz}$ ,  $f_2=7,055\text{MHz}$**

Zu Beginn einer Messung müssen beide Signale auf eine Leistung von  $-6\text{dBm}$  oder  $-10\text{dBm}$  eingestellt werden. Zur Kalibrierung der Pegel benötigt man einen Spektrumanalysator, ein Oszilloskop oder einen HF-Leistungsmesser. Zur Messung des IP3 benötigt der zu testende Empfänger ein in "dB" kalibriertes S-Meter. Als Test-Empfänger verwende ich im Beispiel einen analogen KW SSB-Receiver.

### **1.) Empfänger Empfindlichkeitsmessung, MDS**

Als Maß der Empfindlichkeit (MDS) ist das Grundrauschen des Empfängers definiert. Wenn ein Signal das Grundrauschen um  $3\text{dB}$  anhebt, dann entspricht die Leistung des Signals der Empfindlichkeit des Empfängers. Zur Messung benutzt man einen der beiden Oszillatoren, ein stellbares Dämpfungsglied und ein AC-Voltmeter (**Bild 2**). Zunächst stellt man den NF-Ausgangsspegel ( $U_{\text{eff}}$ ) ohne Signal am Voltmeter auf relativ  $0\text{ dB}$  (z.B.  $100\text{mV}_{\text{eff}}$ ) ein. Mit angeschlossenem Signal vermindert man anschließend die Dämpfung der Eichleitung - ausgehend von  $-130\text{dB}$  - soweit, bis die Spannung am Voltmeter nur noch um den Faktor  $1,414$  ( $20\log U_2/U_1 = 3\text{dB}$ ) ansteigt, im Beispiel auf  $141\text{mV}_{\text{eff}}$ . Den SSB-Überlagerungston stellt man hierbei auf ca.  $1\text{ kHz}$  ein.

Im Beispiel entsteht ein  $3\text{dB}$ -Anstieg  $(S+N)/N$  bei einer Dämpfung von  $119\text{dB}$ . Mit einer Generator-Ausgangsleistung von  $-6\text{dBm}$  ergibt sich demnach eine Grenzemfindlichkeit von

$$\text{MDS} = -6\text{dBm} - 119\text{dB} = -125\text{dBm}$$

bezogen auf eine Bandbreite von  $2,4\text{kHz}$  (SSB)

## 2.) Empfänger Intermodulationsmessung, IMD3

Zur Messung der Intermodulation 3. Ordnung (IM3) verwendet man beide Signalfrequenzen und gleicht den Empfänger auf die IM3-Frequenz  $2f_1-f_2=7,005\text{MHz}$  oder  $2f_2-f_1=7,080\text{MHz}$  ab, bei einem Überlagerungston von 1kHz. Anschließend den Pegel des Zweitonsignals auf  $P_e= 2x-6\text{dBm}$ ,  $2x-10\text{dBm}$ ,  $2x-15\text{dBm}$  und  $2x-20\text{dBm}$  einstellen und die Pegel der entstehenden IM3-Signale über das kalibrierte S-Meter des Empfängers messen und notieren. Hierbei sollte die IP3-Ergebnisse um nicht mehr als  $\pm 1\text{dB}$  voneinander abweichen.

$$IP3 = \Delta IM3/2 + P_e = +25\text{dBm}$$

Messwerte:

$P_e$	IM3-Pegel	IMD3	IP3
$2x-6\text{dBm}$	$-68\text{dBm}$	62dB	+25dBm
$2x-10\text{dBm}$	$-79\text{dBm}$	69dB	+24,5dBm
$2x-15\text{dBm}$	$-95\text{dBm}$	81dB	+25,5dBm
$2x-20\text{dBm}$	$-110\text{dBm}$	90dB	+25dBm

Tabelle 1: Ermittlung des IP3 mit unterschiedlich großen Nutzsignalen ( $P_e$ )

## 3) Berechnung der maximalen Dynamik eines Empfängers

Überträgt man die Meßergebnisse aus **Tabelle 1** in eine Grafik (**Bild 3**) und verfolgt den Verlauf der Intermodulationsprodukte bis herunter bis zum Grundrauschen des Empfängers, wird die maximale verzerrungsfreie Dynamik des Empfängers erkennbar, sie beträgt 100dB.

$$\text{Maximale Dynamik} = P_{\text{max}} - \text{MDS} = 100\text{dB}$$

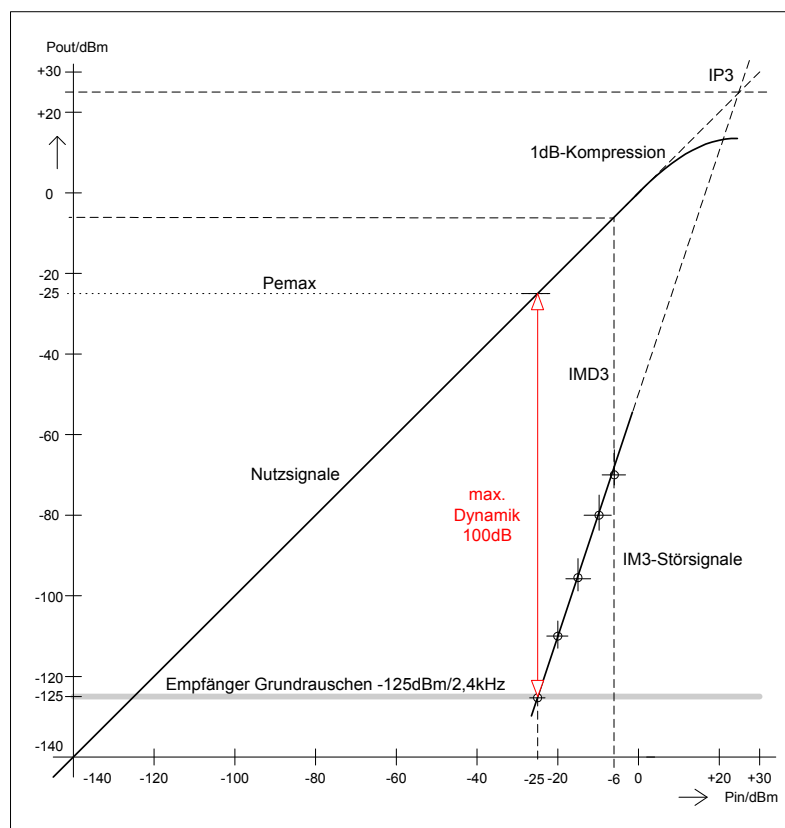


Bild 3: IM3-Verlauf eines Empfängers

Zwei Nutzsignale von -25dBm (S9 +50dB) erzeugen demnach Intermodulationsprodukte 3. Ordnung von -125dBm, identisch mit dem Grundrauschen des Empfängers. Bei Vergrößerung der Nutzsignale, steigen die IM3-Störungen dreimal so schnell an wie die Nutzsignale. Aus diesem Zusammenhang läßt sich der max. zulässige Pegel für einen IM-freien Empfang berechnen

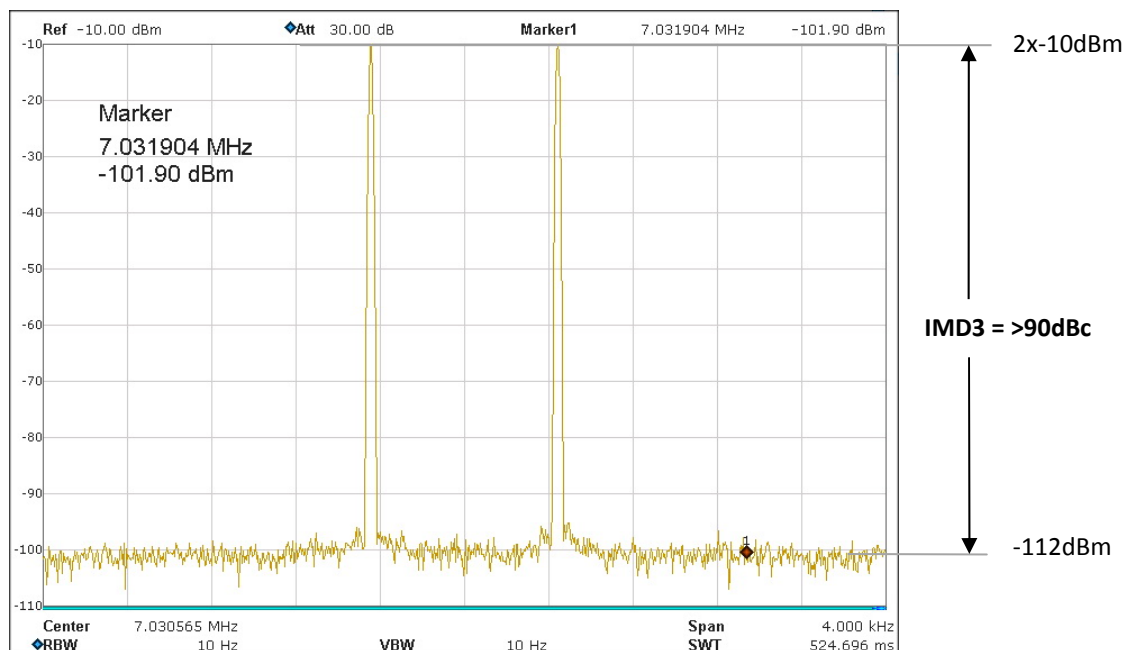
$$P_{\text{max}} = 1/3 \times (2 \times IP3 + \text{MDS}) = -25\text{dBm}$$

und die maximale, intermodulationsfreie Dynamik (Spurious Free Dynamic Range, SFDR)

$$\text{SFDR} = 2 \times (IP3 - P_{\text{max}}) = 100\text{dB}$$

#### Hinweise

- Bei der Wahl von  $P_e$  muß man etwas vorsichtig sein. In Richtung großer Pegel darf  $P_e$  die 1dB-Kompression des Empfängers nicht erreichen, in Richtung kleiner Pegel dürfen die entstehenden IM3-Produkte den Grundrauschpegel des Empfängers nicht unterschreiten. In beiden Fällen würden Messfehler entstehen. Gängige 2-Ton-Pegel sind 2x-10dBm bis 2x-25dBm.
- Der Frequenzabstand ( $\Delta f$ ) von  $f_1$  und  $f_2$  sollte bei anlogenen Empfängern (Überlagerungsempfänger) nicht kleiner als 20 bis 25 kHz sein, weil bei ansonsten das Risiko einer Inband-Intermodulation besteht, welche die Ergebnisse beeinflussen kann (4). Bei direktabtastenden digitalen SDR-Receiver dürfen die Abstände beliebig klein sein, hier gibt es keine Inband-Intermodulation.
- Der Intermodulationsabstand (IMD3) des 2-Tongenerators beträgt  $>90\text{dBc}$  (Bild 4).



**Bild 4: IM3-Festigkeit des HF-Zweitongenerators,  $\text{IMD3} > 92\text{dBc}$**

#### 4.) Messung des Empfänger-Seitenbandrauschens

Beide Oszillatoren besitzen ein Phasenrauschen von nur  $-158\text{dBm/Hz}$  in 2kHz Abstand zum Träger und können somit auch als Testgeneratoren für Messungen des Seitenbandrauschens (SBN) von Empfängern verwendet werden.

Die SBN-Messung verläuft ebenfalls nach der "3dB-Methode", nur wird der Empfänger jetzt nicht auf die Oszillatorfrequenz abgestimmt, sondern auf Abstände von  $\Delta f = 5, 10, 15$  und  $20\text{kHz}$  oberhalb

oder unterhalb der Trägerfrequenz. Bei diesen Abständen wird der Pegel ( $P_e$ ) des verwendeten Oszillators so weit erhöht, bis sich am Lautsprecherausgang ein Anstieg des Grundrauschens von  $(S+N)/N=3\text{dB}$  ergibt. Die dafür jeweils erforderlichen Pegel ( $P_e$ ) werden notiert und das SBN daraus berechnet (Tabelle 2).

$$\text{SBN} = \text{MDS} - P_e - 10\log B$$

Offset $\Delta f$	$P_e$	SBN
5kHz	-26dBm	<b>-136dBm/Hz</b>
10kHz	-11dBm	<b>-148dBm/Hz</b>
15kHz	-7dBm	<b>-152dBm/Hz</b>
20kHz	-5dBm	<b>-154dBm/Hz</b>
Messgrenze!		

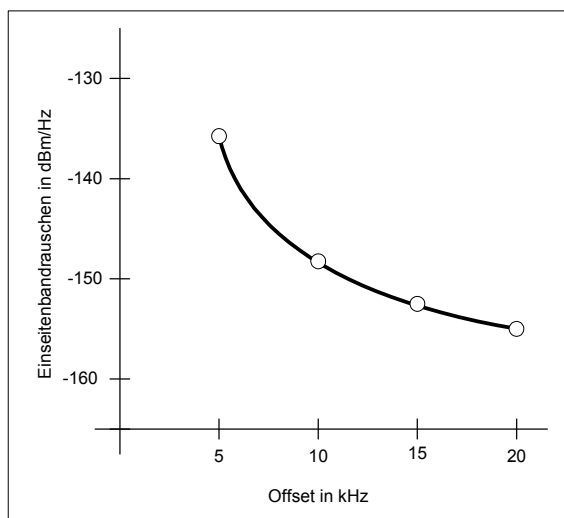
**Tabelle 2: Seitenbandrauschen (SBN) eines Empfängers**

Beispiel:

In 10kHz Abstand zum Träger desensibilisiert ein Signal von  $P_e=-11\text{dBm}$  den Empfänger um 3dB. Daraus berechnet sich ein SBN von

$$\text{SBN} = \text{MDS} - P_e - 10\log B = -125\text{dBm} - (-11\text{dBm}) - 10\log 2400\text{Hz} = -148\text{dBm/Hz}$$

Überträgt man die Messwerte aus Tabelle 2 in eine Grafik, entsteht die Kurve nach **Bild 5**.



**Bild 5: Seitenbandrauschen des Empfängers, Frequenz 7.050 MHz**

#### Hinweise

- Die Messgrenze für SBN-Messungen an Empfängern liegt bei ca.  $-158\text{dBc/Hz}$
- Das Phasenrauschen des Testoszillators lässt sich noch weiter reduzieren, indem man zwischen Oszillator und Empfänger ein schmalbandiges und steiles Bandpaßfilter (Quarzfilter) schaltet. Die Filterflanken schneiden die Rauschseitenbänder des Oszillatorsignals rechts und links ab, so dass SBN-Messungen bis herunter zu  $-170\text{dBm/Hz}$  möglich werden (2).
- Vorsicht vor Übersteuerung des Empfängers, bei Einspeisung großer Signale ( $>0\text{dBm}$ )

### 5.) Messung des RMDR eines Empfängers (Reciprocal Mixing Dynamic Range)

Starkes Seitenbandrauschen des Empfängers, kann kleine Signale in Nachbarschaft großer Signale „zudecken“ und den Empfänger unempfindlich machen. Beim Mischvorgang moduliert sich das Seitenbandrauschen des Überlagerungsoszillators (analog) oder ADC's (digital) auf das empfangene Signal auf (reziprokes Mischen) und kann damit zur Blockierung des Empfängers führen. Der durch das reziproke Mischen reduzierte Dynamikbereich wird als "Reciprocal Mixing Dynamic Range" bezeichnet. Gute Empfänger besitzen in geringem Trägerabstand ein RMDM von >100dB.

Der RMDR berechnet sich aus Differenz des Pegels ( $P_e$ ), der für eine 3dB-Desensibilisierung des Empfängers erforderlich ist und seiner Grenzemfindlichkeit (MDS). Beide Werte wurden unter 1.) und 4.) schon ermittelt.

$$\text{RMDR} = P_e - \text{MDS}$$

Offset	$P_e$	RMDR
5kHz	-26dBm	<b>99dB</b>
10kHz	-11dBm	<b>114dB</b>
15kHz	-7dBm	<b>118dB</b>
20kHz	-5dBm	<b>120dB</b>

Tabelle 3: RMDR des Empfängers, MDS=-125dBm/2,4kHz

Beispiel:

In 10kHz Abstand zum Träger desensibilisiert ein Signal von  $P_e=-11\text{dBm}$  den Empfänger um 3dB. Daraus berechnet sich ein RMDR von

$$\text{RMDR} = P_e - \text{MDS} = -11\text{dBm} - (-125\text{dBm}) = 114\text{dBm}$$

Ergebnis: Das SBN ist sehr viel kleiner als das RMDR und begrenzt die max. Dynamik des Empfängers auch in geringen Trägerabständen demnach nicht.

### 6.) Intermodulationsmessung an HF-Verstärkern und HF-Endstufen

Eine weitere, typische Applikation des HF 2-Ton-Generators, ist die Messung der IM-Festigkeit von HF-Verstärkern und HF-Endstufen. Den entsprechenden Messaufbau zeigt **Bild 6** und als Beispiel **Bild 7** die IM3-Verzerrung eines 20dB HF-Breitbandverstärkers (LNA), der z.B. im Eingang eines Empfängers eingebaut ist.

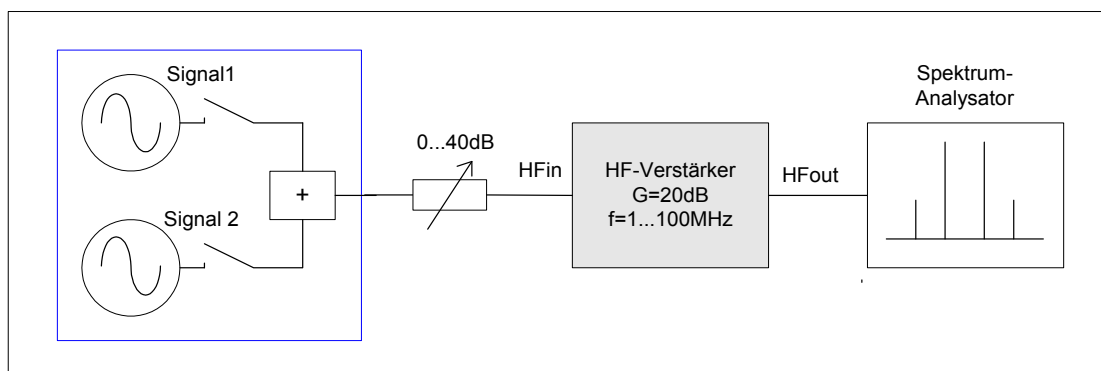
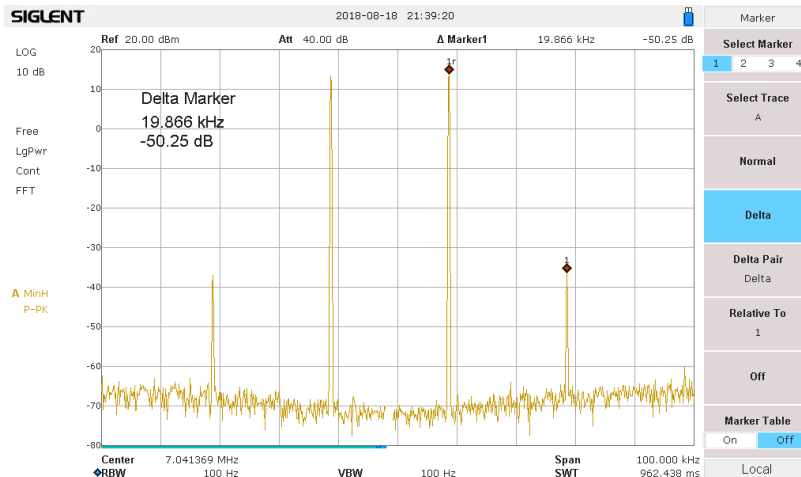


Bild 6: HF-Zweitongenerator für Linearitätsmessung an HF-Verstärkern und HF-Endstufen

Bei einer Ansteuerung des Verstärkers mit  $2x-6\text{dBm}$  erzeugt der HF-Verstärker ein Ausgangssignal von  $2x+14\text{dBm}$  und IM3-Verzerrungsprodukte, die  $50\text{dB}$  unterhalb der Nutzprodukte liegen. Daraus berechnet sich ein IP3 des Verstärkers von

$$\text{IP3in} = \Delta\text{IM3}/2 + \text{Pe} = 50\text{dB}/2 + (-6\text{dBm}) = +19\text{dBm}, \text{ bezogen auf den Eingang}$$

$$\text{IP3out} = \text{IP3in} + \text{G} = 19\text{dBm} + 20\text{dB} = +49\text{dBm}, \text{ bezogen auf den Ausgang}$$



**Bild 7: IM3-Test an einem HF-Breitbandverstärker,  $G=20\text{dB}$**

Mit Hilfe des IP3 und der Rauschzahl des Verstärkers ( $\text{NF}=4\text{dB}$ ), läßt sich eine Aussage über den nutzbaren Dynamikbereich des HF-Verstärkers machen. Laut Definition ist die obere Grenze der Aussteuerung dann erreicht, wenn die Pegel der IM3-Produkte gleich der Empfindlichkeitsgrenze (Rauschpegel) des Verstärkers sind.

Die Empfindlichkeitsschwelle ( $S$ ) des Verstärkers, bezogen auf eine Bandbreite von  $2.4\text{kHz}$ , beträgt dann

$$S = -174\text{dBm}/\text{Hz} + \text{NF} + 10\log B = 174\text{dBm}/\text{Hz} + 4\text{dB} + 34\text{dB} = -136\text{dBm}$$

mit  $B = 10\log 2400\text{Hz}$

Die Leistung von zwei Eingangssignalen, deren IM3-Produkte gerade die Empfindlichkeitsschwelle des HF-Verstärkers erreichen, berechnet sich daraus zu

$$\text{P}_{\text{max}} = 1/3 \times (2x \text{IP3} + S) = 1/3 \times (38 + (-136)) = -32,6\text{dBm}$$

woraus sich ein max. IM-freier Dynamikbereich des Verstärkers ergibt von

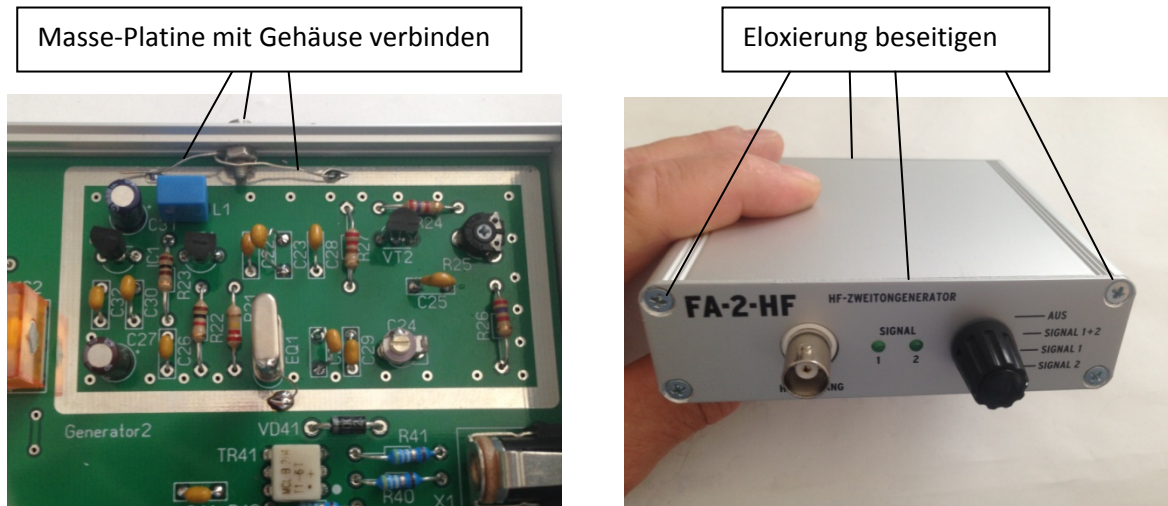
$$\Delta\text{IM} = \text{P}_{\text{max}} - S = -32,6 - (-136) = 103,4\text{dB}$$

### Änderungen am HF-Zweitongenerator

#### a) Verbesserung der HF-Abschirmung

Das mitgelieferte Gehäuse des 2-Ton-Generators ist eloxiert (ähnlich einer Lackierung) und die Teile des Gehäuses teile haben trotz Verschraubung keine elektrische Verbindung zueinander. Deswegen

sollte man die Eloxierung an den Verbindungsstellen zwischen den Alu-Bleichen entfernen. Zusätzlich sollte die Masse der Platine mit dem Gehäuse verbunden werden. Dazu habe ich zwei Schrauben auf der rechten und linken Seite des Gehäuses angebracht und diese über Drähte mit der Masse der Platine verbunden. Anschließend ist der 2-Ton-Generator HF-dicht und vor Einstrahlung geschützt.

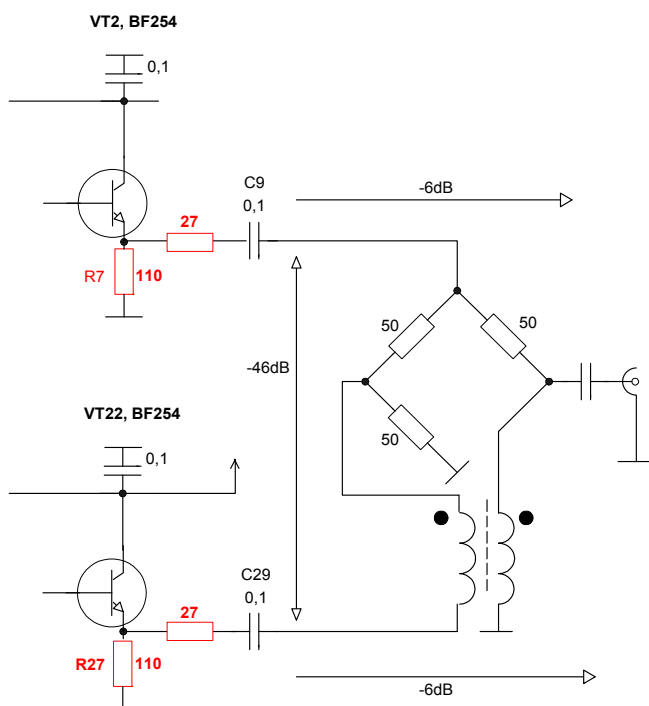


**Bild 8: Eloxierung unterhalb der Schrauben beseitigen, Masse der Platine mit Gehäuse verbinden**

**b) Verbesserung der IM-Festigkeit**

Durch geringfügige Änderung der Ausgangswiderstände von VT2 und VT22 läßt sich Anpassung an die Wheatstone-Brücke verbessern, so dass IMD3-Messungen mit Abständen von >90dB möglich sind.

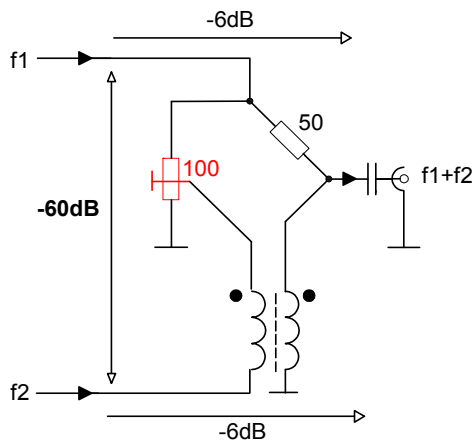
- R7/27 auf von 220 Ohm auf 110 Ohm verkleinern
- 27 Ohm Widerstand in Serie mit C9/29 schalten



**Bild 9: Änderungen an den Ausgangstransistoren (s. Schaltplan)**

### c) Verbesserung der Richtschärfe

- Austausch von R40/41 (2x500Ω) mit einem 100 Ω-Trimmer und Abgleich auf maximale Entkopplung zwischen den Generatoren, auf bis zu 60dB.



**Bild10: Verbesserung der Entkopplung durch Abgleich der Wheatstone-Brücke auf größte Richtschärfe**

### d) Frequenzeinstellung

- C1/21 als Trimmer 10-30pF ausführen, anschließend kann die Quarzfrequenz eingestellt werden

### Literatur

#### (1) Bausatz für den HF-Zweitongenerator

[https://www.box73.de/product\\_info.php?products\\_id=3847](https://www.box73.de/product_info.php?products_id=3847)

[https://www.box73.de/file\\_dl/bausaetze/BX-089.pdf](https://www.box73.de/file_dl/bausaetze/BX-089.pdf)

#### (2) Messung Seitenbandrauschen von Empfängern und Oszillatoren

W. Schnorrenberg, DC4KU

FA 10/11-2018

#### (3) HF-Doppeltongenerator

W. Schnorrenberg, DC4KU

<http://www.dc4ku.darc.de/HF-Zweiton-Generator.pdf>

#### (4) Inband-Intermodulation

W. Schnorrenberg, DC4KU

[http://www.dc4ku.darc.de/Inband\\_Intermodulation.pdf](http://www.dc4ku.darc.de/Inband_Intermodulation.pdf)

Werner Schnorrenberg, DC4KU

17.09.2018

Rev.: 30.09.2018, 07.10.2018



