

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 (MSD), Großsignalfestigkeit (IMD3), Dynamik, RMDR und Seitenbandrauschen eines KW-Empfängers.

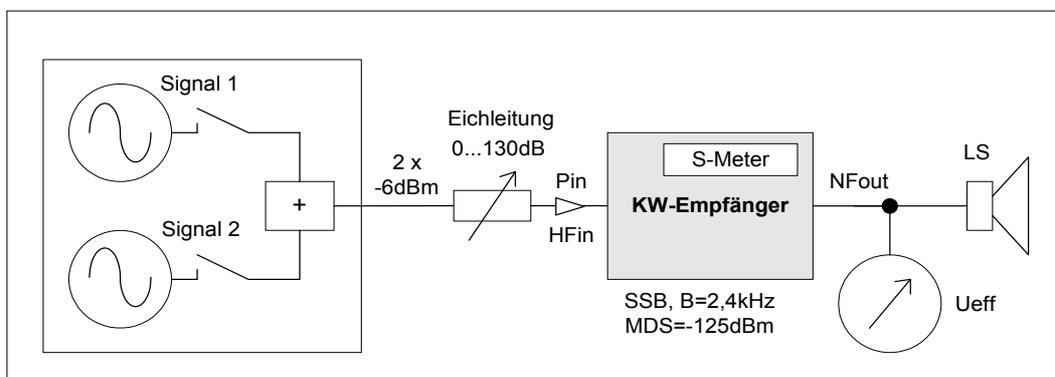


Bild 2: HF 2-Ton-Generator für Empfänger messungen, $f_1=7,030\text{MHz}$, $f_2=7,055\text{MHz}$

Zu Beginn einer Messung müssen beide Signale auf eine Leistung von -6dBm oder -10dBm 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.

1.) Empfänger Empfindlichkeitsmessung (MDS)

Als Maß der Empfindlichkeit (MDS) ist das Grundrauschen des Empfängers definiert. Wenn ein Signal das Grundrauschen um 3dB 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-Ausgangspegel (U_{eff}) ohne Signal am Voltmeter auf relativ 0 dB (z.B. $100\text{mV}_{\text{eff}}$) ein. Mit angeschlossenem Signal vermindert man anschließend die Dämpfung der Eichleitung - ausgehend von -130dB - 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 kHz ein.

Im Beispiel entsteht ein 3dB -Anstieg $(S+N)/N$ bei einer Dämpfung von 119dB . Mit einer Generator-Ausgangsleistung von -6dBm 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) und $f_e=7,1\text{MHz}$

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

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

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

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

Hinweise

- Pin: Bei Wahl der Eingangssignale muß man etwas vorsichtig sein. In Richtung großer Pegel darf Pin die 1dB-Kompression des Empfängers nicht erreichen, in Richtung kleiner Pegel dürfen die entstehenden IMD3-Produkte den Grundrauschpegel des Empfängers nicht unterschreiten. In beiden Fällen würden Messfehler entstehen. Gängige 2-Ton-Pegel sind 2x-10dBm bis 2x-25dBm.
- Δf: Der Frequenzabstand von f1 und f2 sollte bei anlognen Empfängern (Überlagerungsempfänger) nicht kleiner als 20 bis 25 kHz sein, weil 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.
- MD3: Der Intermodulationsabstand des 2-Tongenerators in **Bild 4** beträgt über 92dBc und die IM-Produkte liegen unterhalb der Messgrenze des Analysators.

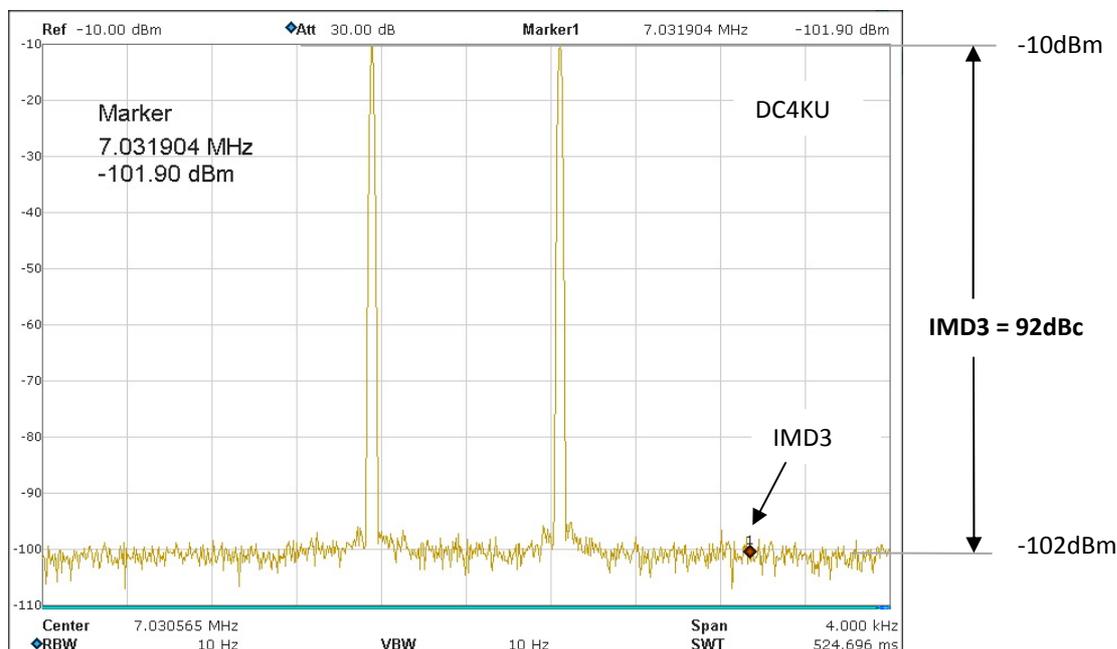


Bild 4: IM3-Festigkeit des HF-Zweitongenerators, IMD3 Abstand > 92dBc

4) Messung der Großsignalfestigkeit (IFFS) digitaler Empfänger

Zur Bestimmung der IMD3-Festigkeit direkt abtastender SDR's, verwendet man standardmäßig ebenfalls ein HF 2-Ton-Signal. Zwei gleich große HF-Signale, die in geringem Frequenzabstand zueinander stehen (f1=7,050MHz, f2 = 7,052MHz), werden auf den HF-Eingang des Empfängers

gegeben und deren Pegel so weit erhöht, bis die unerwünschten IM3-Störungen bei $2f_1-f_2$ und $2f_2-f_1$ gleich groß sind wie das Empfänger-Grundrauschen $(S+N)/N=2$, also genau 3dB über dem Grundrauschen liegen. Die Differenz zwischen Eingangspegel (P_i) und Grundrauschen (MDS) ergibt dann den IMD-freien Dynamikumfang (ΔIMD3) des Empfängers. Diesen Wert bezeichnet man auch als **IFFS (Interference Free Dynamic Range)**.

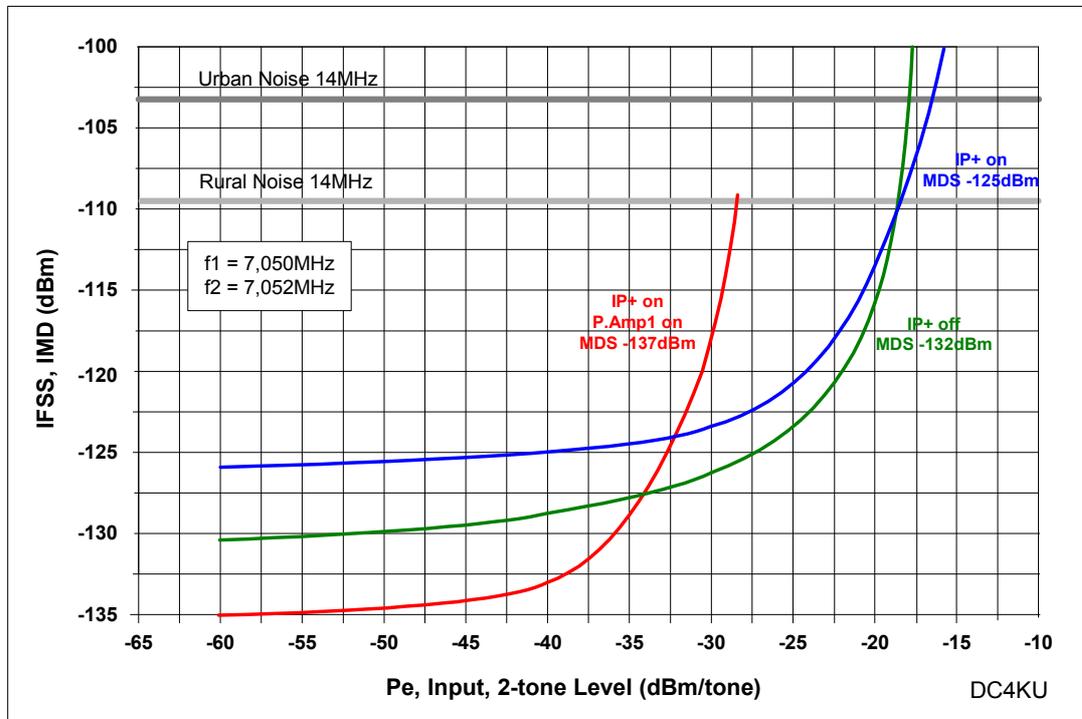


Bild 5: IFFS-Kurven eines IC-7300

Anders als bei analog aufgebauten Empfängern, steigen bei direkt abtastenden SDR-Receiver die IMD3-Produkte bei Pegelvergrößerung nicht mit 3-facher Geschwindigkeit an, sondern verbleiben bei einem niedrigen Grundpegel. Qualitativ hochwertige SDR-Receiver erzeugen IMD-Produkte, die bis hin zur Begrenzung (OVF), stets unterhalb des Empfänger-Grundrauschens liegen und somit nicht störend in Erscheinung treten. **Bild 5** zeigt die IFFS-Kurven des **IC-7300**, mit IP+ on/off und mit zugeschaltetem Amplifier. Alle Messkurven liegen weit unterhalb der Rural - und Urban Noise-Linie, d.h. mit zugeschalteter Antenne liegen die IM-Verzerrungsprodukte stets unterhalb des Empfänger-Grundrauschens und treten erst bei Eingangspegeln von größer -20dBm ($S_9 + 53$) aus dem Rauschen in Erscheinung. Wird der Vorverstärker (P.AMP 1) eingeschaltet (rote Kurve), reduziert sich die Dynamik um die Größe der Verstärkung.

Beispiel grüne Messkurve: Bei $P_{in}=2x-25\text{dBm}$ entstehen IMD3-Produkte bei -127dBm . Daraus folgt: $\text{IFSS} = -25 - (-123) = 98\text{dB}$. Ein "Intercept-Point 3. Order" (IP3) kann aus den Kurven in **Bild 5** natürlich nicht ermittelt (berechnet) werden, bei A/D-Wandlern existiert kein IP3!

5.) Messung des Empfänger-Seitenbandrauschens (SBN)

Die Oszillatoren des 2-Ton-Generators besitzen ein Phasenrauschen von nur -158dBm/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 20kHz 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**).

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

mit $B=2,4\text{kHz}$

Offset (Δf)	P_e	SBN
5kHz	-26dBm	-136dBm/Hz
10kHz	-11dBm	-148dBm/Hz
15kHz	-7dBm	-152dBm/Hz
20kHz	-5dBm	-154dBm/Hz
Messgrenze erreicht!		

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 6**.

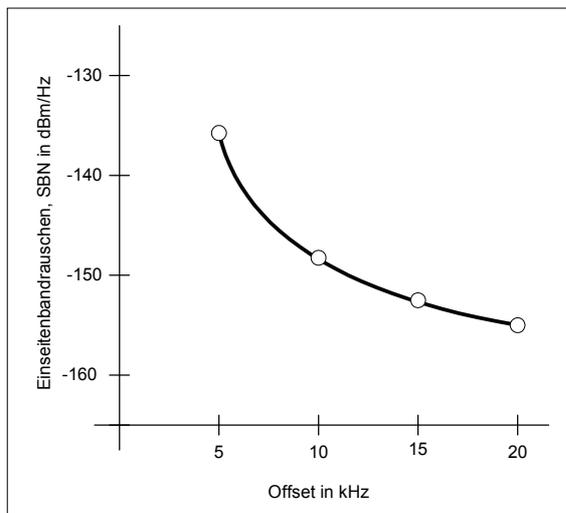


Bild 6: Seitenbandrauschen eines Empfängers, Frequenz: 7,050 MHz

Hinweise

- Die Messgrenze für SBN-Messungen an Empfängern liegt bei ca. -158dBc/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 -170dBm/Hz möglich werden (**2**).
- Vorsicht vor Übersteuerung des Empfängers, bei Einspeisung großer Signale ($>0\text{dBm}$)

6.) Ermittlung des "Reciprocal Mixing Dynamic Range" (RMDR) eines Empfängers

Starkes Seitenbandrauschen eines Empfängers, kann kleine Signale in Nachbarschaft großer Signale „zudecken“ und den Empfänger unempfindlich machen. Beim Mischen moduliert sich das SBN des Überlagerungsoszillators (analog) oder ADCs (digital) auf das Empfangssignal auf (reziprokes Mischen) und kann damit zur Blockierung des Empfängers führen. Der durch reziprokes Mischen reduzierte Dynamikbereich wird als "Reciprocal Mixing Dynamic Range" bezeichnet. Der RMDR berechnet sich aus Differenz des Pegels (P_e), der für eine 3dB-Desensibilisierung des Empfängers erforderlich ist und seiner Grenzempfindlichkeit (MDS).

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

Beispiel: In 5kHz Abstand zum Träger desensibilisiert ein CW-Signal von -26dBm den Empfänger um 3dB. Daraus berechnet sich ein RMDR von

$$\text{RMDR} = P_e - \text{MDS} = -26\text{dBm} - (-125\text{dBm}) = 99\text{dBm}$$

Offset Δf	P_e	RMDR
5kHz	-26dBm	99dB
10kHz	-11dBm	114dB
15kHz	-7dBm	118dB
20kHz	-5dBm	120dB

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

Das RMDR sollte in geringem Abstand zum Träger größer sein, als sein IMD3-Abstand, so dass das Seitenbandrauschen die Dynamik des Empfängers nicht beeinflussen kann. Gute Empfänger besitzen im Abstand von 2kHz ein RMDR von größer 100dB.

7.) 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 7** und als Beispiel in **Bild 8** die IM3-Verzerrung eines 20dB HF-Breitbandverstärkers (LNA), der vor den Eingang eines Empfängers geschaltet ist.

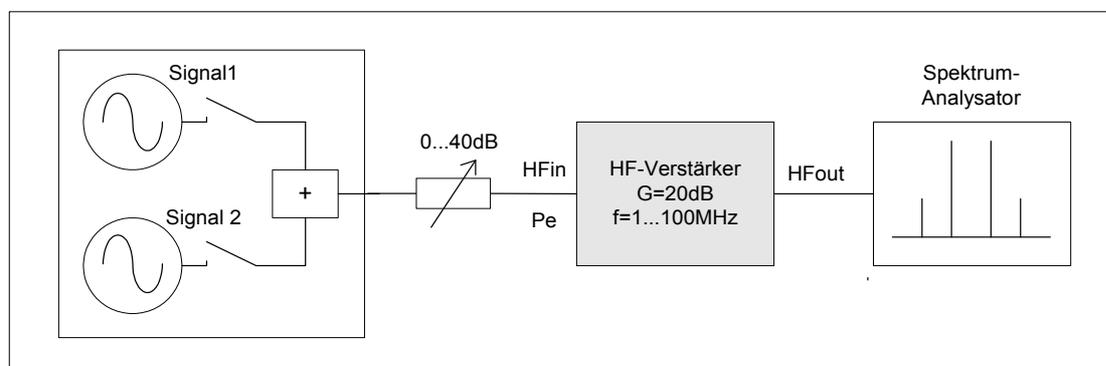


Bild 7: HF-Zweitonen-Generator für Linearitätsmessung an HF-Verstärkern und HF-Endstufen

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 50dB unterhalb der Nutzprodukte liegen. Daraus berechnet sich ein IP3 des Verstärkers von

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

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

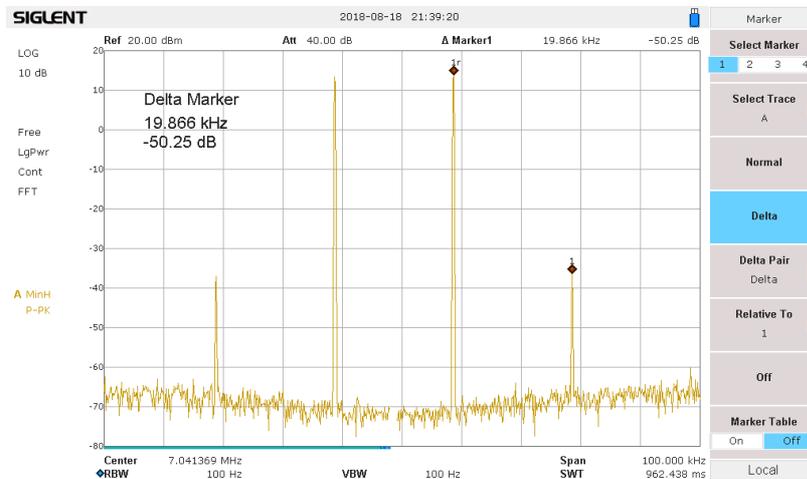


Bild 8: IM3-Test an einem HF-Breitbandverstärker, G=20dB

Mit Hilfe des $IP3$ und der Rauschzahl des Verstärkers ($NF=4dB$), 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 2.4kHz, beträgt dann

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

mit $B = 10\log 2400Hz$

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

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

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

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

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-Blechen 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.

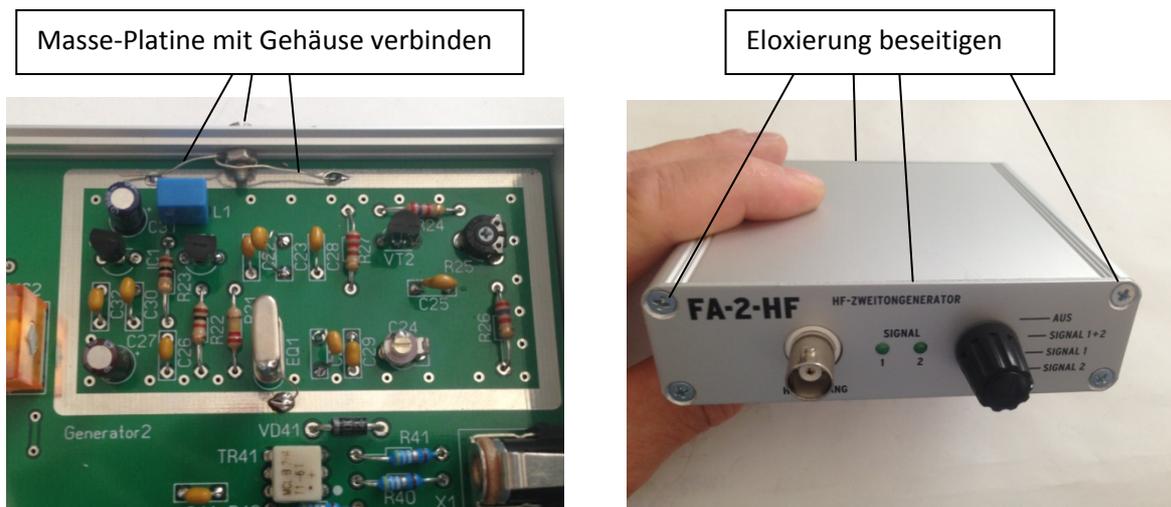


Bild 8: Eloxierung unterhalb der Schrauben beseitigen, Masse der Platine mit Gehäuse verbinden

b) Verbesserung der IM3-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

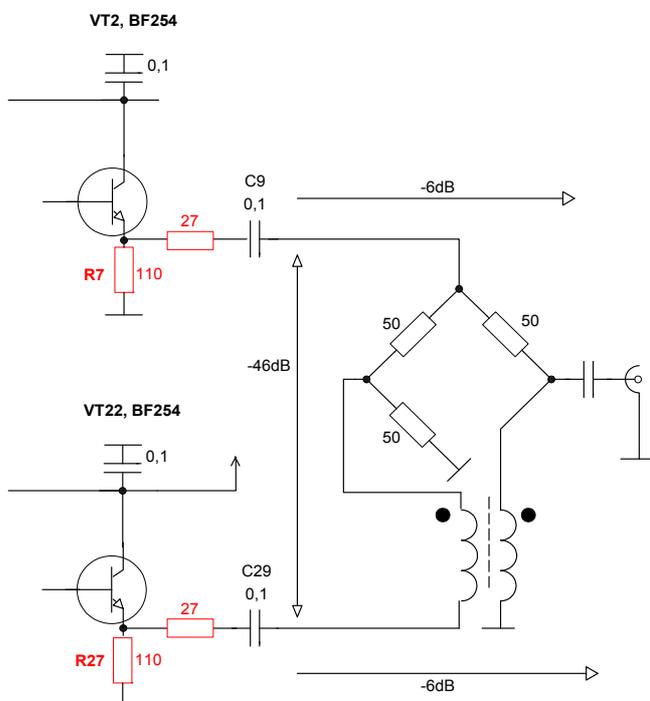


Bild 9: Änderungen an den Ausgangstransistoren (s. Schaltplan)

c) Verbesserung der Richtschärfe

- Austausch von R40/41 (2 x 50 Ohm) mit einem 100 Ohm-Trimмер und Abgleich auf maximale Entkopplung zwischen den Generatoren, auf bis zu 60dBc.

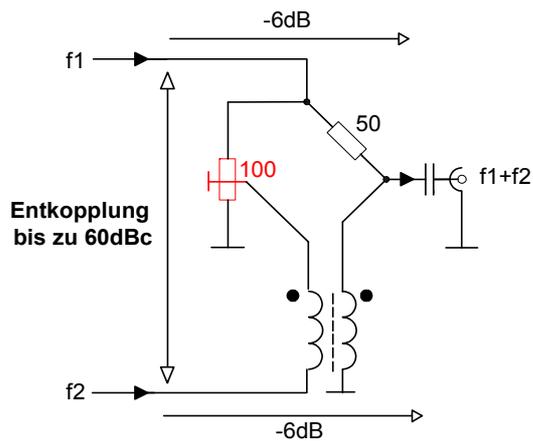


Bild10: Verbesserung der Entkopplung durch Abgleich der Wheatstone-Brücke auf größte Richtschärfe

d) Frequenzeinstellung

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

Literatur

(1) Bausatz für den HF-Zweitongenerator

https://www.box73.de/product_info.php?products_id=3847

https://www.box73.de/file_dl/bausaetze/BX-089.pdf

(2) Messung Seitenbandrauschen von Empfängern und Oszillatoren

W. Schnorrenberg, DC4KU

FA 10-11/2018

<https://dc4ku.darc.de/Messung-Seitenbandrauschen.pdf>

(3) HF-Zweitongenerator

W. Schnorrenberg, DC4KU

FA 8-12/2016

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

(4) Inband-Intermodulation

W. Schnorrenberg, DC4KU

https://dc4ku.darc.de/Inband_Intermodulation.pdf

Werner Schnorrenberg, DC4KU

17.09.2018

Rev.: 09.2018, 10.2018, 12.2019

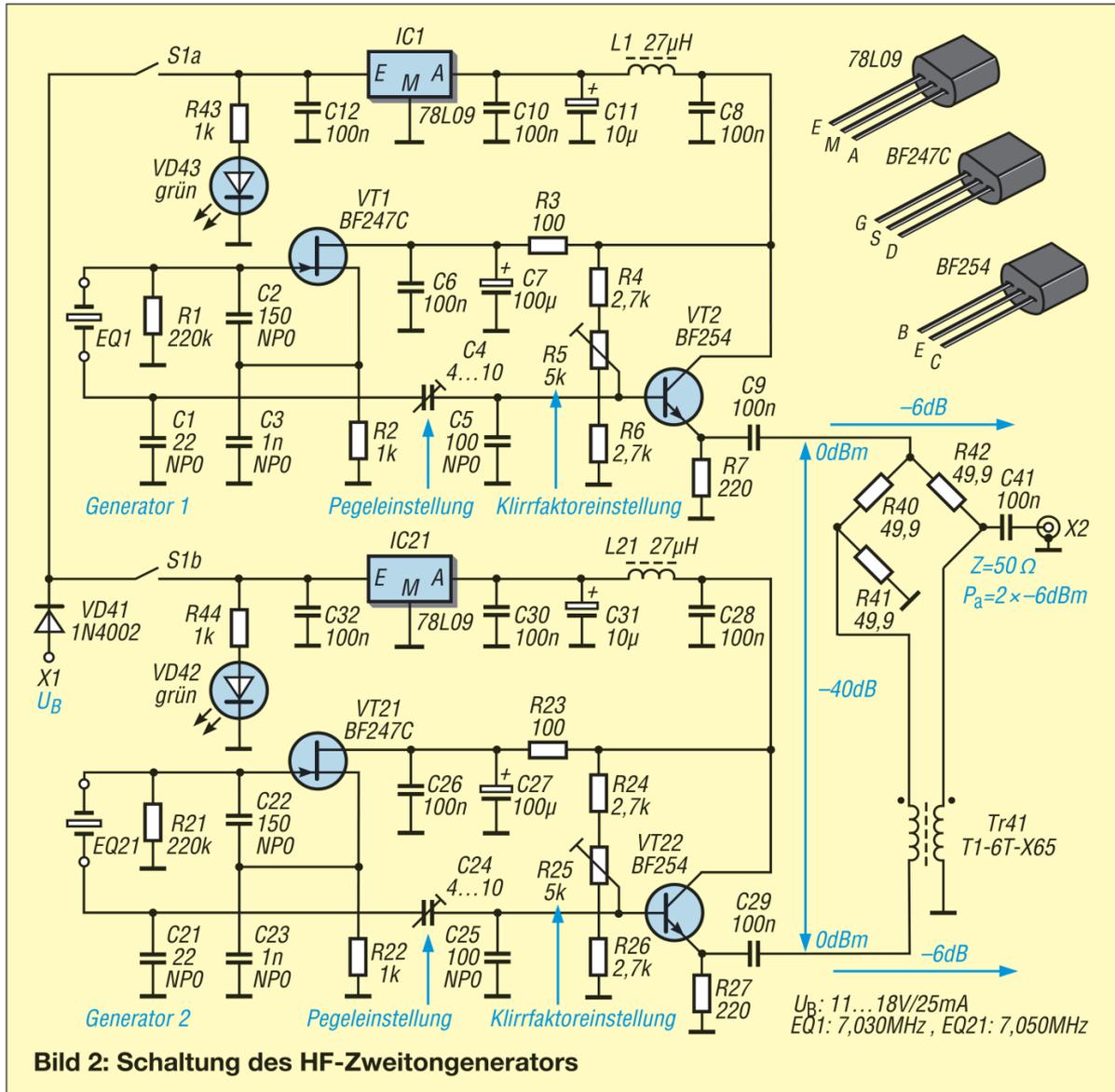


Bild 2: Schaltung des HF-Zweitengenerators