

Messung kritischer Spezifikationen eines HF-Empfängers

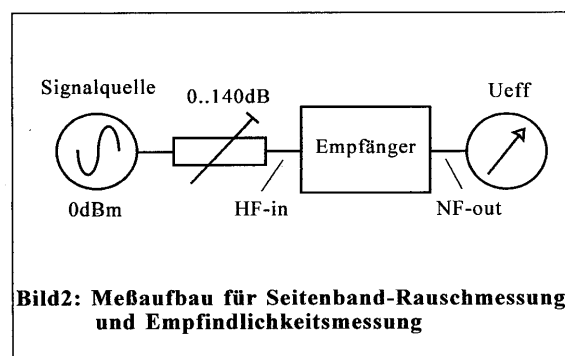
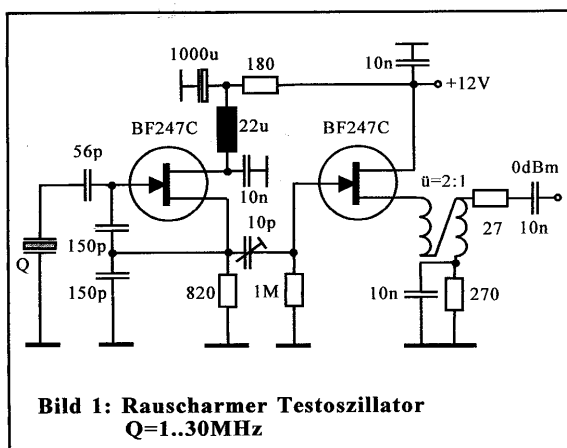
Die kritischen Spezifikationen eines Empfängers sind Frequenzstabilität, Selektivität, Empfindlichkeit, Seitenbandrauschen und Dynamik. Moderne Sender und Empfänger verfügen heute aufgrund hochwertiger Synthesizertechnik über ausgezeichnete Frequenzlang- und -kurzzeitstabilität. Hierbei werden die Frequenzen aller Überlagerungoszillatoren von einem hochstabilen Referenzoszillator abgeleitet. Die absolute Genauigkeit des Referenzoszillators kann bei Bedarf über einen genauen Frequenzzähler kontrolliert und ggf. "nachgezogen" werden.

Die Selektionseigenschaft eines Empfängers hängt im wesentlichen von der Qualität der verwendeten ZF-Quarzfilter, deren Flankensteilheit und Weitlabselektion ab. KW-Empfänger arbeiten oft als 2bis 3-fach Überlagerungsempfänger mit einer hochliegenden, ersten ZF bei 40 bis 90MHz mit 2 bis 8-pol. Quarzfilter, gefolgt von der tieferliegenden zweiten ZF bei 9 bis 10,7MHz, in der die eigentliche Selektion für Betriebsarten wie CW, SSB, AM und FM stattfindet. Durch Addition der selektiven Wirkung des 1. und 2. ZF-Quarzfilters und guten Abschirmmaßnahmen werden insgesamt häufig Weitlabselektionen von über 100dB erreicht.

Die verbleibenden kritischen und wesentlichen Spezifikationen des Empfängers sind Empfindlichkeit, Seitenrauschen und Dynamik. Leider erreichen besonders Seitenbandrauschen und Dynamik auch in modernen Empfängern oft keine besseren, teilweise sogar schlechtere Werte, als in guten Geräten vor 10 Jahren. Nachfolgend soll gezeigt werden, wie diese kritischen Spezifikationen teilweise mit Amateurmäßigen Mitteln nachgemessen werden können. Als Messobjekt dient der in (1) beschriebene KW-Empfänger. Alle Messungen wurden in der Betriebsart SSB, mit 2,3KHz-Filterbandbreite und geöffneter Regelleitung durchgeführt

Empfindlichkeit

Als Maß der Empfindlichkeit ist das Grundrauschen des Empfängers definiert. Legt man ein Signal an den Empfängereingang dessen Pegel das Empfängerrauschen (NF-Ausgangspegel) um 3dB anhebt, dann entspricht die Leistung des Signals nach $(S+N)/N=2$ der des Grundrauschens. Für diese Messung benötigt man einen rauscharmen Testoszillator mit 0 dBm Ausgangspegel (**Bild 1**), eine Eichleitung von 0-140dB und ein AC-NF-Voltmeter.



Den Messaufbau zeigt **Bild 2**. Zunächst stellt man den NF-Ausgangspegel (U_{eff}) ohne Signal am Voltmeter auf relativ 0 dB ein. Mit angeschlossenem Signal vermindert man anschließend die Dämpfung der Eichleitung -ausgehend von -140dB- soweit, bis die NF-Ausgangsspannung am Voltmeter um den Faktor 1,414 ($20\log U_2/U_1 = 3\text{dB}$) ansteigt. Den Überlagerungston stellt man hierbei auf ca. 1 kHz ein.

Die Empfindlichkeit (S) des Empfängers entspricht dann dem eingestellten Dämpfungswert, im Beispiel:

$$S = -130\text{dBm} / 2,3\text{kHz Bandbreite}$$

Nach der Gleichung

$$P_R(W) = K \cdot t_0 \cdot B \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} P_R = \text{Rauschleistung} \\ K = \text{Boltzmannkonstante} \\ t_0 = \text{Temperatur} \\ B = \text{Bandbreite} \end{array}$$

ist die Rauschleistung bei konstanter Temperatur (t_0) direkt abhängig von der Messbandbreite B. Deshalb ist eine Angabe der Empfindlichkeit ohne Benennung der Messbandbreite (genauer: Rauschbandbreite) unzulässig!

Rauschzahl

Nach Ermittlung der Grenzempfindlichkeit des Empfängers kann die Rauschzahl berechnet werden. Dazu muss die Rauschbandbreite des eingesetzten Selektionsfilters bekannt sein. Die Messung der Rauschbandbreite eines Filters ist sehr aufwendig und würde den Rahmen dieses Artikels sprengen(2). Vereinfacht kann man aber davon ausgehen, dass die Rauschbandbreite eines Quarzfilters der -6dB-Bandbreite entspricht bzw. dem 1,2-fachen der -3dB-Bandbreite. Die -6dB-Bandbreite des im Beispiel verwendeten Filters (XF-9B) beträgt lt. Datenblatt 2,4kHz.

Bezieht man nun die Empfängerempfindlichkeit (S) auf die theoretische Rauschbandbreite von 1 Hz, erhöht sich die Empfindlichkeit um den Faktor 2400 bzw. logarithmisch um den Wert $10\log 2400 = 34\text{dB}$.

$$S = -130 \text{ dBm} - 34\text{dB} = -164\text{dBm/Hz}$$

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

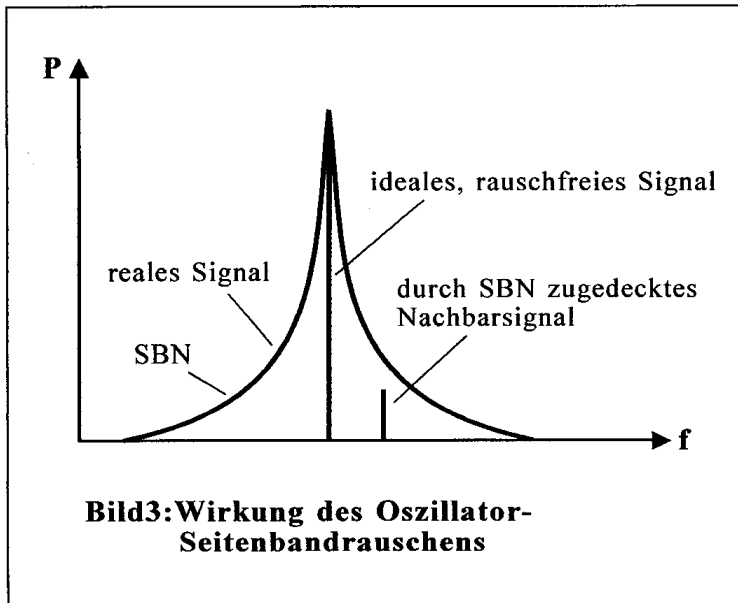
$$\text{NF} = -164\text{dBm/Hz} - (-174\text{dBm/Hz}) = 10\text{dB}$$

Mit anderen Worten: Der Signal/Rausch-Abstand(S/N) eines empfangenen Signals verschlechtert sich um 10dB zwischen Eingang und Ausgang des Empfängers .

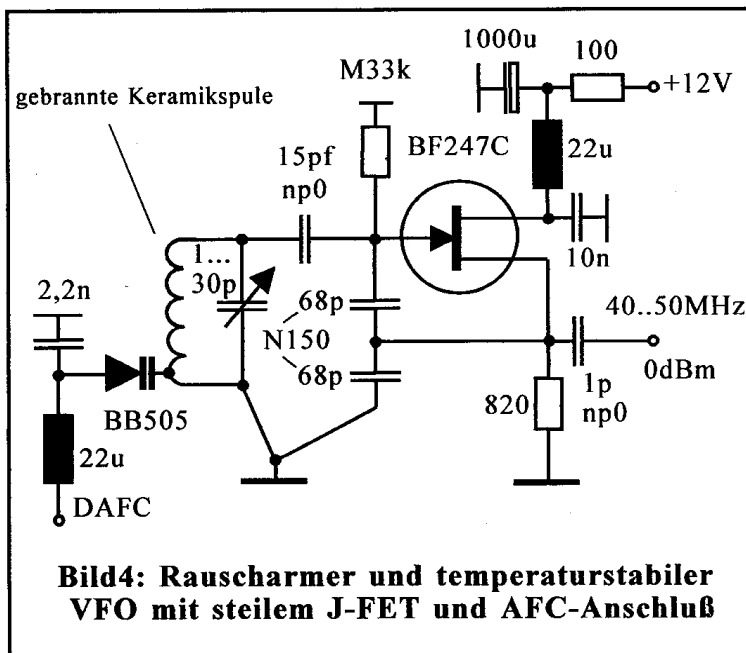
Seitenbandrauschen

Das SSB-Seitenbandrauschen (SBN) ist ein weiteres, wichtiges Kriterium zur qualitativen Beurteilung des Empfängers. Starkes SBN des 1.LO's kann ein kleines Signal neben einem starken Signal "zudecken" und so einen empfindlichen Empfänger "taub" machen (**Bild 3**). Beim Mischvorgang moduliert sich das Oszillator-Seitenbandrauschen auf das empfangene Signal auf und kann damit zur Blockierung des Empfängers führen. Kleine Signale in der Nähe des Trägers, können dabei trotz ausreichender Filterselektion und

Flankensteilheit vom Phasenrauschen des Oszillators zugedeckt werden.



Die Rauschamplituden auf beiden Seiten des Trägers entstehen durch Phasenmodulation des Trägers mit stochastischen Rauschsignalen (Random Noise) wobei das Seitenbandrauschen nicht konstant über den Frequenzbereich verteilt ist, sondern vom Träger ausgehend mit ca. 9dB/Oktave abfällt (3). Aus diesem Grund muss definiert werden in welchem Abstand vom Träger das Seitenbandrauschen gemessen wird. SBN wird ebenso wie Rauschen in Leistung/Bandbreite (dBm/Hz) angegeben. Geringes Phasenrauschen weisen Oszillatoren mit hoher Schwingkreisgüte, rauscharmer Versorgungsspannung, rauscharmen Halbleitern und guter mechanischer Stabilität auf. **Bild 4** zeigt die Schaltung eines rauscharmen und frequenzstabilen VFO, der in Empfängern nach (7) und (1) eingebaut ist und im Beispiel gemessen wird.



Zur Messung des SBN verwendet man den gleichen Messaufbau wie zur Empfindlichkeitsmessung und setzt wieder die "3dB-Methode" ein. Ein praktisch rauschfreies Testsignal hierzu liefert der Generator nach **Bild 1**. Die Empfangsfrequenz wird auf $f_c+10\text{kHz}$ eingestellt und der Signalpegel so weit erhöht, bis die NF-Ausgangsspannung um 3dB angestiegen ist. (Desensibilisierung). Im Beispiel erfolgt das bei

$$P_e = -20\text{dBm} \text{ bei } f = 10\text{kHz}$$

Das SBN erreicht damit den Wert des Grundrauschens, d.h. ein rauschfreies -20dBm Eingangssignal desensibilisiert die Empfindlichkeit des Empfängers in 10kHz Abstand vom Träger um 3dB.

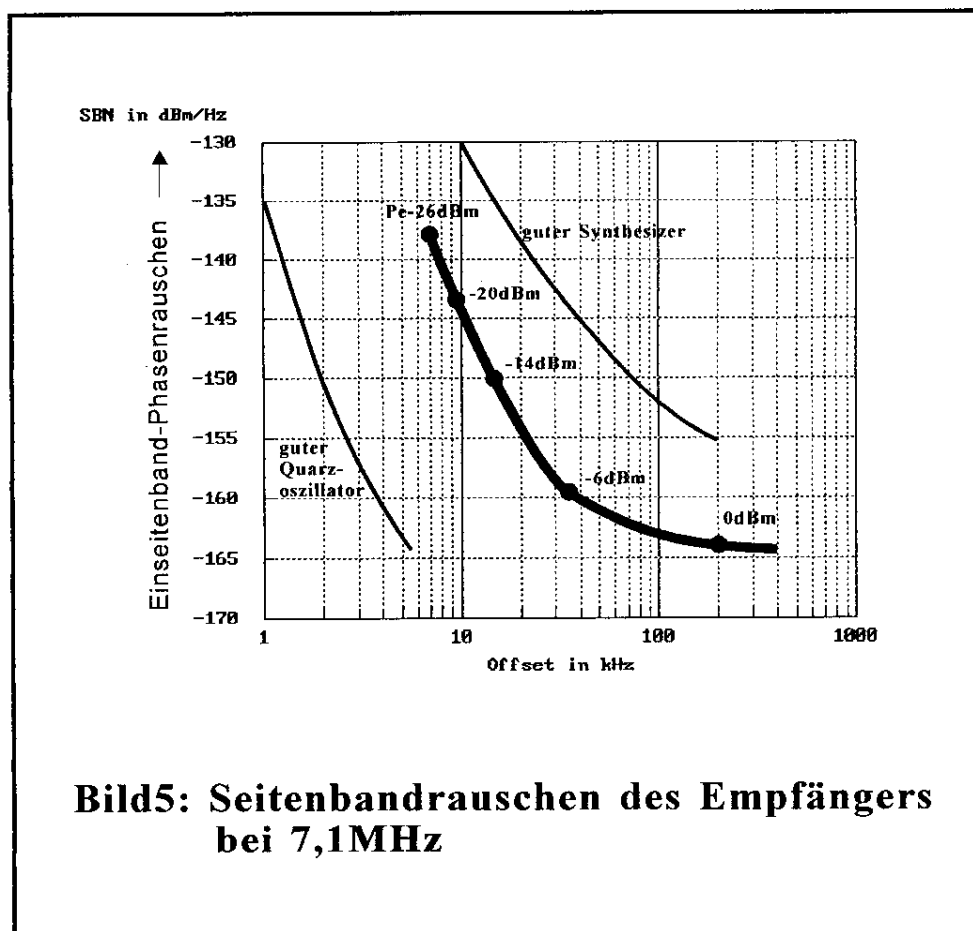
$$\text{SBN} = S - P_e - B_k \text{ mit } P_e = \text{Signalpegel für 3dB Desensibilisierung}$$

$$B_k = \text{Bandbreiten-Korrekturfaktor (34dB)}$$

$$S = \text{Empfindlichkeit}$$

$$\text{SBN} = (-130\text{dBm} + 20\text{dB} - 34\text{dB})/\text{Hz} = -144\text{dBm}/\text{Hz} \text{ in } 1 \text{ kHz vom Träger}$$

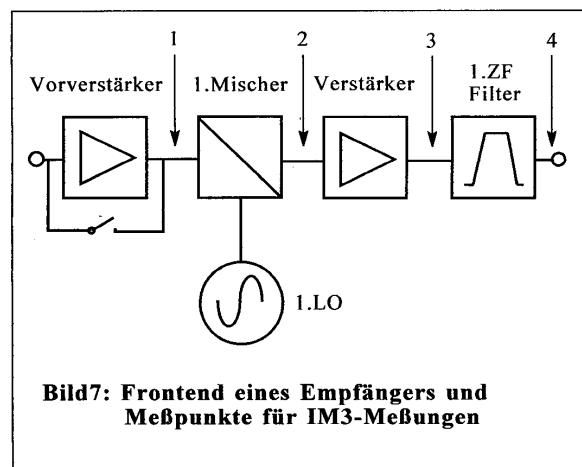
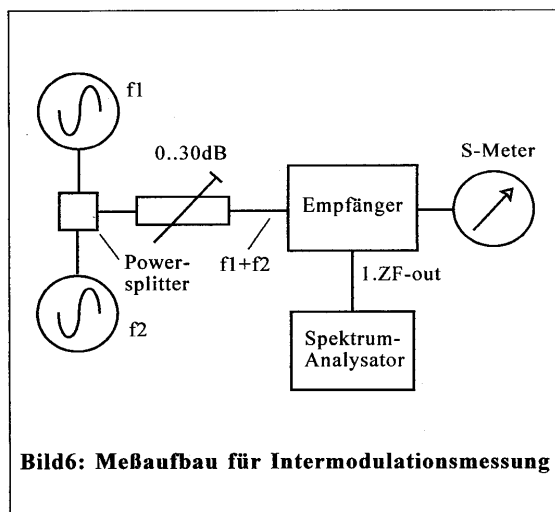
Bei größerer Entfernung f vom Träger kann das SBN so Punkt für Punkt durchgemessen und graphisch aufgetragen werden (**Bild 5**).



Bei guten Empfängern sollte die bis zur Desensibilisierung (Zustopfen) verarbeitbare Eingangsleistung (P_e) im Trägerabstand von $f=1\text{kHz}$ mindestens den Wert der oberen Aussteuergrenze ($P_{e\text{max}}$) erreichen, bei dem die ersten Intermodulationsstörungen (IM_3) auftauchen. Ansonsten bestimmt das SBN das Großsignalverhalten des Empfängers. Ein Vorteil der hier beschriebenen Meßmethode ist, dass das SBN des gesamten Empfängers mit allen Umsetzungs-Oszillatoren erfasst wird, wobei im Regelfall der 1. Lokaloszillator maßgeblich für das SBN verantwortlich ist. Vorsicht ist geboten bei hohen Signalpegeln von bis zu 0dBm (1 mW) und darüber, da durch Übersteuerung (Blocking, 1 dB -Kompression) eventuell Messfehler auftreten können. Außerdem muss das Quarzfilter über ausreichende Flankensteilheit und Weitabselektion verfügen.

Dynamik

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. Über die Entstehung, Auswirkungen und die praktische Messung von IM-Störungen wurde in (4), (5), und (6) ausführlich berichtet. In Empfängern treten hauptsächlich IM-Störungen 2.-, 3.- und 5.- Ordnung auf. Verantwortlich hierfür ist die endliche Linearität des Empfängereingangs. Den Messaufbau für IM-Messungen, mit einem geeigneten Doppelton-Generator beschrieben in (4), zeigt **Bild 6** und **Bild 7** die Messpunkte für IM_3 -Messungen im Front-End eines HF-Empfängers.



Bei zwei Eingangssignalen von jeweils $P_e = -6\text{dBm}$ entstehen am Ausgang des ersten Mixers IM_3 -Sörprodukte mit über 78dB Intermodulationsabstand zu den Nutzprodukten (**Bild 8**).

Daraus folgt ein Intercept-Point 3. Ordnung ($1P_3$) von

$$IP_3 = \text{IM}_3/2 + P_e = 33\text{dBm}$$

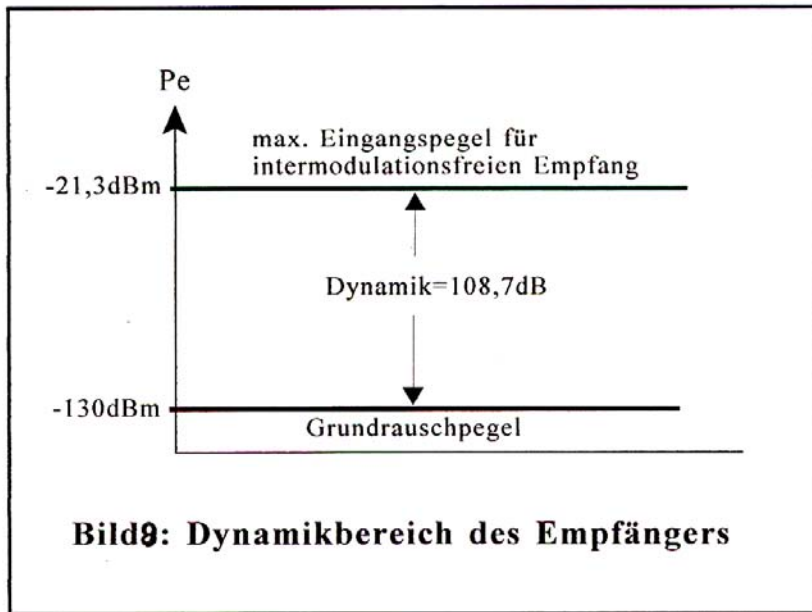
IP_3 = Intercept Point 3. Ordnung, bezogen auf den Eingang

Lt. Definition ist die obere Grenze der Aussteuerung ($P_{e\text{max}}$) dann erreicht, wenn die Störungen der Intermodulationsprodukte die Leistung des Grundrauschens (S) erreichen..

$$P_{e\text{max}} = 1/3 \cdot (2 \times IP_3 + S) = -21,3\text{dBm}$$

Daraus berechnet sich der Umfang des verzerrungsfreien Dynamikbereichs (**Bild 8**) zu

$$\text{Dynamik} = P_{\text{emax}} - S = 108,7\text{dB}$$



Würde man als obere Grenze der Aussteuerung die 1 dB-Kompression definieren, ergäbe sich ein Dynamikbereich von über 140dB.

Die genaueste IM_3 -Messung lässt sich jedoch erst am Ausgang des 1. Filters realisieren. Da hierbei auch die Verzerrungen des Duplexers, Verstärkers und Quarzfilters mit einbezogen werden. Der Spektrumanalysator wird hierzu direkt an den 50-Ohm-Ausgang des 1.ZF-Filters angeschlossen und durch langsame Abstimmung des VFO's die Nutz- und Störpegelnacheinander gemessen und zueinander ins Verhältnis gesetzt.

Alternativ zum Spektrumanalysator kann hinter dem Filter auch ein empfindliches HF-Millivoltmeter eingesetzt werden. Verfügt der Empfänger über ein hochgenaues; kalibriertes S-Meter mit einem Dynamikumfang von über 80 dB - was leider in wenigsten Fällen vorhanden sein dürfte - lassen sich Intermodulationsmessungen auch damit durchführen.

Sicherheitshalber sollten die Intermodulationsverzerrungen auch mit kleineren Eingangspegeln gemessen werden, da sich bei zu großer Aussteuerung durch mögliche Kompression ein zu guter IP_3 ergeben kann.

Zur Erreichung des max. Dynamikumfangs eines Dioden-Ringmischers ist neben dem richtigen Impedanzabschluss aller Mischer-Anschlüsse eine ausreichende hohe Oszillatorleistung wichtig. Bei zu geringer Oszillatorleistung erreichen Dioden-Ringmischer nicht die im Datenblatt angegebene Großsignalfestigkeit.

Das trifft insbesondere für sog. Super-High-Level-Mixer zu, wie z.B. RAY 3, SAY 1 oder 1 E 5. Die Messung in **Bild 9** wurde mit einem solchen Mischer und optimaler Oszillatorleistung von +25dBm durchgeführt. **Bild 10** zeigt hingegen das Ausgangsspektrum desselben Mischers mit "nur" +20dBm (100 mW) Ansteuerpegel. Mit zwei Eingangssignalen von -5dBm sinkt der IP_3 auf 25dBm ab.

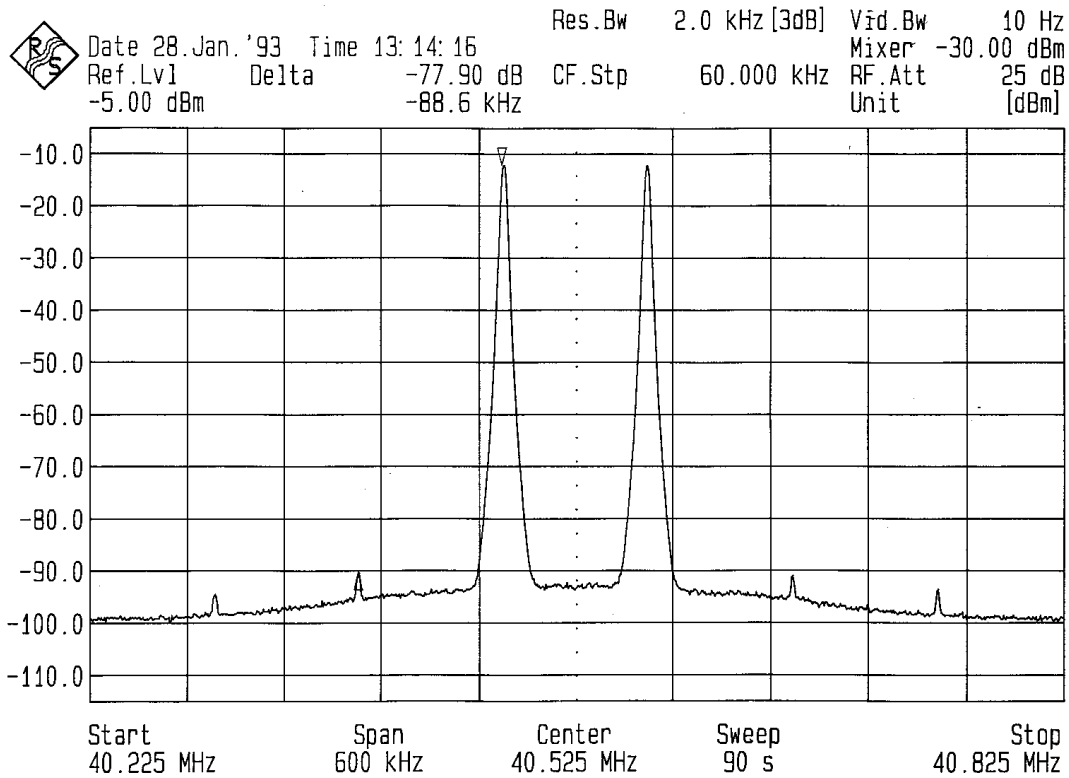


Bild 9: IM-Messung am Ausgang des 1.Mischers, $IM_3 = 78\text{dBc}$, $IP_3 = 33\text{dBm}$

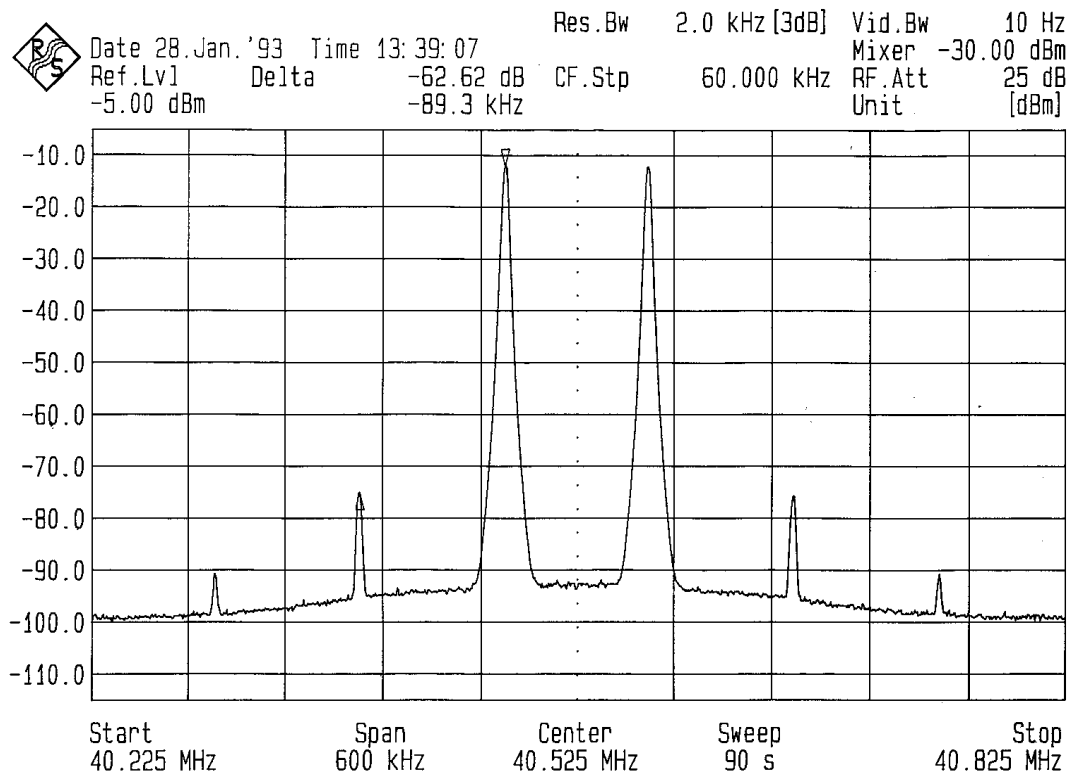


Bild10: Gleiche Messung wie in Bild9, aber mit zu geringer Oszillatorleistung

Einsatz eines Vorverstärkers

Zur Steigerung der Empfindlichkeit verfügen viele KW-Empfänger über einen zuschaltbaren HF-Vorverstärker.

Welchen Einfluss hat ein Vorverstärker auf Dynamik und Empfindlichkeit?

Bild 11 zeigt das Intermodulationsspektrum des Empfängers mit zugeschaltetem Vorverstärker nach (4) mit einer Verstärkung $G_V=7\text{dB}$ und Rauschzahl $NF_V=3$.

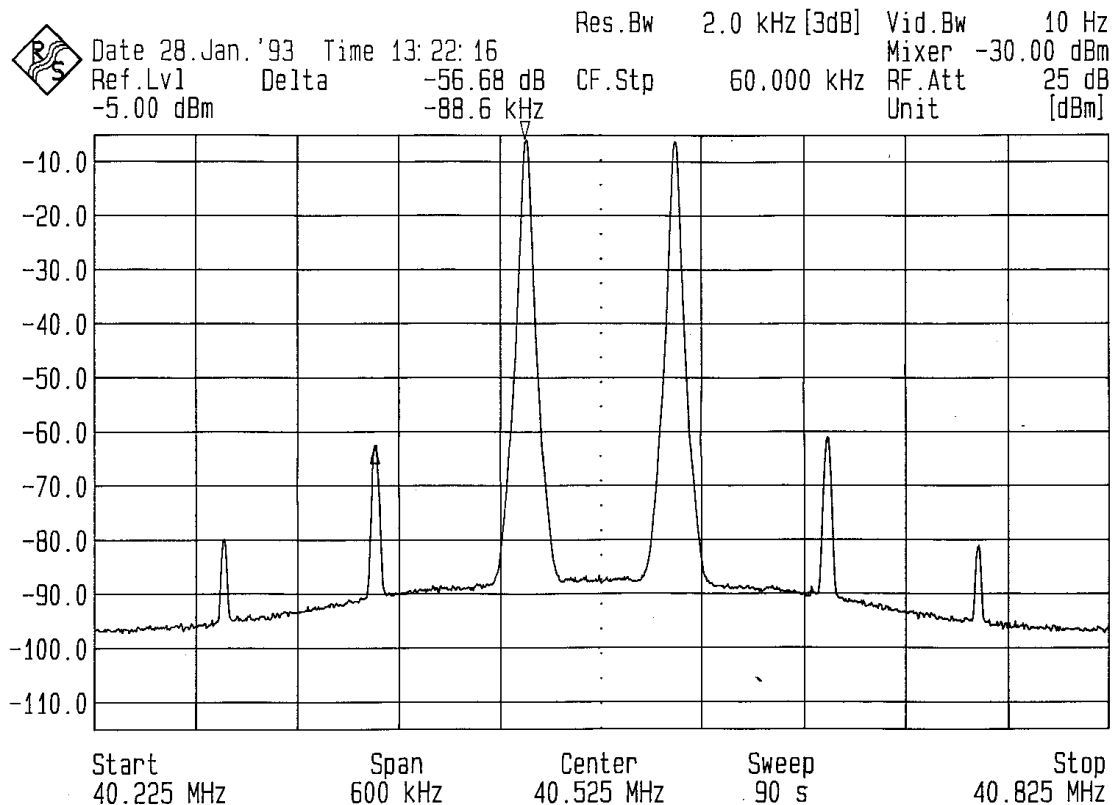


Bild 11: IM-Messung mit Vorverstärker, $G_V = 7\text{dB}$

Der IM_3 -Abstand verkleinert sich mit Vorverstärker von $76,5\text{dBc}$ auf 57dBc , Intermodulationsprodukte 5.Ordnung werden deutlich sichtbar und der IP_3 reduziert sich auf

$$IP_3 = 57\text{dBc}/2 - 6\text{dBm} = 22,5\text{dBm}$$

Da der Empfänger selbst einen IP_3 von über 30dBm besitzt, bestimmt jetzt der Vorverstärker die Großsignalfestigkeit.

Weiterhin ist aus **Bild 11** zu erkennen, dass bei Vergrößerung der Nutzsignale, die IM_3 -Produkte um mindestens den dreifachen ihrer ursprünglichen Werte anwachsen (4). In dieser "unangenehmen" Eigenschaft nichtlinearer Verzerrung liegt das ursächliche Problem aller IM-Störungen.

Die Rauschzahl des Empfängers mit $NF_E=10\text{dB}$ verbessert sich durch die Vorverstärkung auf

$$\begin{aligned}
 NF_{\text{Ges}} &= NF_V + (NF_E - 1)G_V \\
 &= 2 + (10 - 1)/5 = 3,8
 \end{aligned}$$

$$NF_{Ges} = 10 \log 3,8 = 5,8 \text{dB}$$

und damit das Grundrauschen auf den Wert

$$S = -174 \text{dBm/Hz} + NF_{GES} + 34 \text{dB} = -134,2 \text{dBm}$$

und der max. Eingangspegel für intermodulationsfreien Empfang wird zu

$$P_{\text{emax}} = (2 \cdot 22,5 \text{dB} - 134,2 \text{dBm})/3 = -29,7 \text{dBm}$$

Ergebnis:

Vorverstärker erhöhen die Empfindlichkeit, reduzieren aber den Dynamikbereich und das Großsignalverhalten des Empfängers mindestens um den Betrag der Verstärkung .
Antennen-Vorverstärker sollten deshalb nur bei wirklich schlechten Empfangsbedingungen zugeschaltet werden.

W. Schnorrenberg
Februar 1993

Literatur:

- (1) W. Schnorrenberg, Homemade KW-Tranceiver mit hochliegender ZF, CQ-DL 3/93
- (2) Hochfrequenz und Mikrowellentechnik, Technische Akademie Esslingen
- (3) W. Schnorrenberg, Rauschmessungen mit dem Spektrumanalysator, Elektronik4/90
- (4) W. Schnorrenberg, Messung nichtlinearer Verzerrungen, CQ-DL 5/91
- (5) M. Martin, Extrem lineares Eingangsmodul, Intern. Elektronische Rundschau 4/75
- (6) W. Schnorrenberg, Spektrumanalyse-Theorie und Praxis, Vogel Buchverlag
- (7) M. Martin, Rauscharmer UKW-Oszillator für ein Empfängereingangsteil mit großem Dynamikbereich