Dynamik von 144MHz Amateurfunk Transceivern
Teil 3: Messungen der Empfänger

François Callias, HB9BLF

Im HB-Radio 2/2018 wurde die Berechnung der Ausbreitung im Freiraum zwischen zwei 144MHz Stationen vorgestellt. Ein Berechnungsbeispiel wurde mit zwei Contest-Stationen in 60km Distanz voneinander beschrieben, bei denen die Antennen gegeneinander gerichtet sind. Die Friis Formel ergab einen Pegel des empfangenen Signals von 25µW ($P_{RX} = -16dBm$). Die Dynamik des empfangenen Signals (119dB) ist dabei das Verhältnis zwischen der Signal-Amplitude und dem Rauschen an der Empfangsantenne ($P_{NOISE} = -135dBm$).

Der zweite Artikel (HB-Radio 3/2018) hat die Messungen der Dynamik von 19 144MHz Sendern beschrieben.

Dieser Artikel (Teil 3) ist den Messresultaten der Empfänger gewidmet.

Ein detaillierter Bericht (Französische Version) steht auf der Webseite www.hb9ww.org/technique/divers zur Verfügung.

Die Messmethode

Bild 1 zeigt den Messplatz mit den Messgeräten.

Für den Test der Empfänger hatten wir folgende Geräte im Einsatz:

- HP 8920B, Messgerät für analoge Modulationen 400kHz - 1GHz
- XTAL Oszillator auf 144.300MHz zentriert, $P_{OUT} = -10dBm$
- Variables Dämpfungsglied $0 \cdots -100dB$
- Power Combiner / Splitter 144MHz
- Niederfrequenz (NF) Voltmeter

Das elektrische Schema des Messsystems ist in Bild 2 zu sehen. Der Empfängereingang ist am HP 8920B und am XTAL Oszillator über einen Power Combiner angeschlossen.

Der HP 8920B liefert ein CW Signal von geringer Amplitude auf die Empfangsfrequenz (f_{RF}). Der XTAL Oszillator ist die Störquelle; Er liefert einen CW Träger auf 144,300MHz mit einem Pegel zwischen -10Bm (100µW) und -50dBm. Ein serielles variables Dämpfungsglied erlaubt es, die Amplitude dieser Störquelle am Empfängereingang zu verringern.

Der Empfänger befindet sich im SSB Modus. Sein Audioausgang wird auf den Audioeingang des HP 8920B und parallel mit dem NF Voltmeter verbunden.

Wir messen zuerst die Empfindlichkeit des Empfängers. Dann messen wir seine Widerstandsfähigkeit gegenüber einem Störsignal mit starker Amplitude.

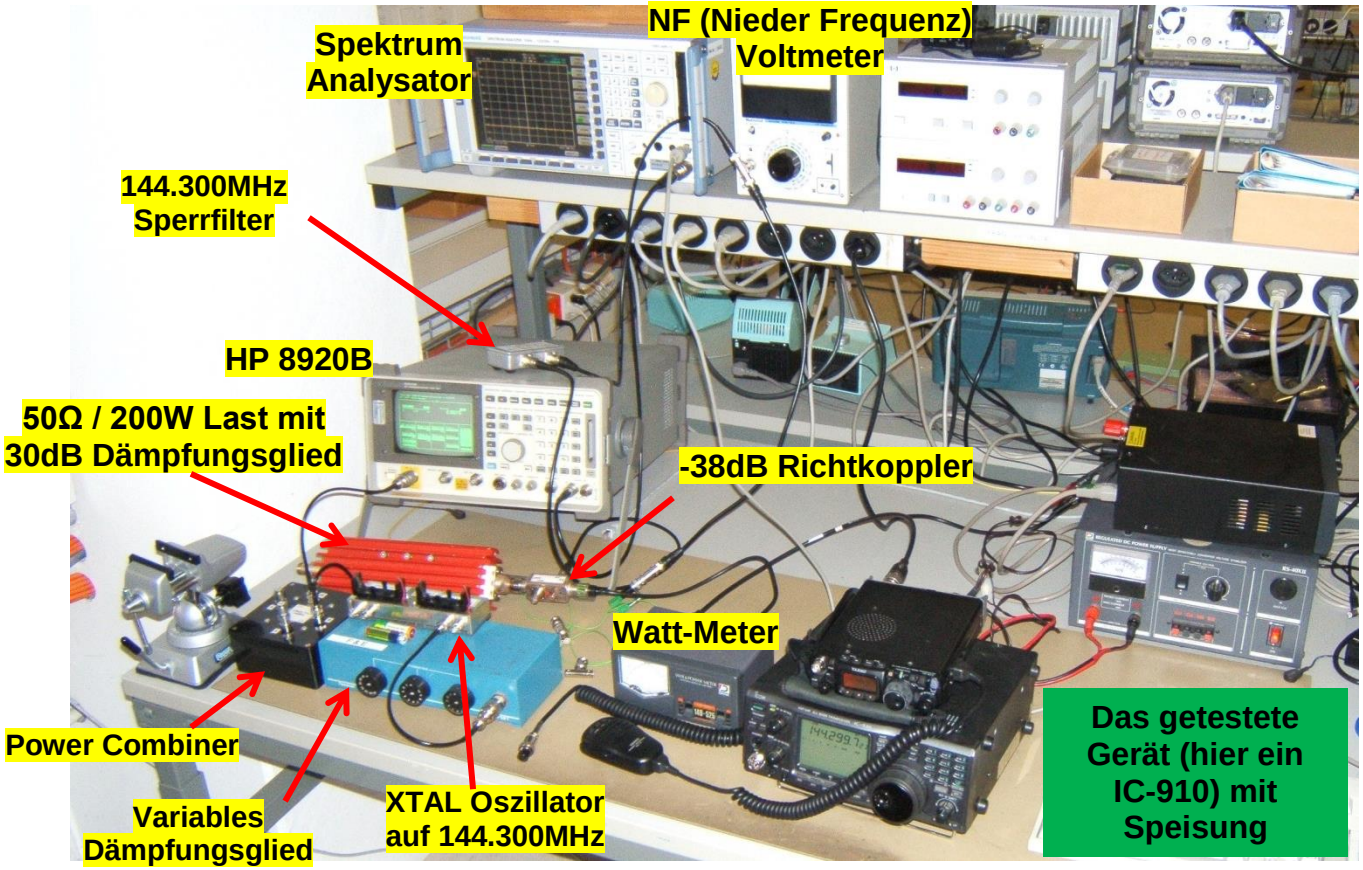

Bild 1: Messplatz

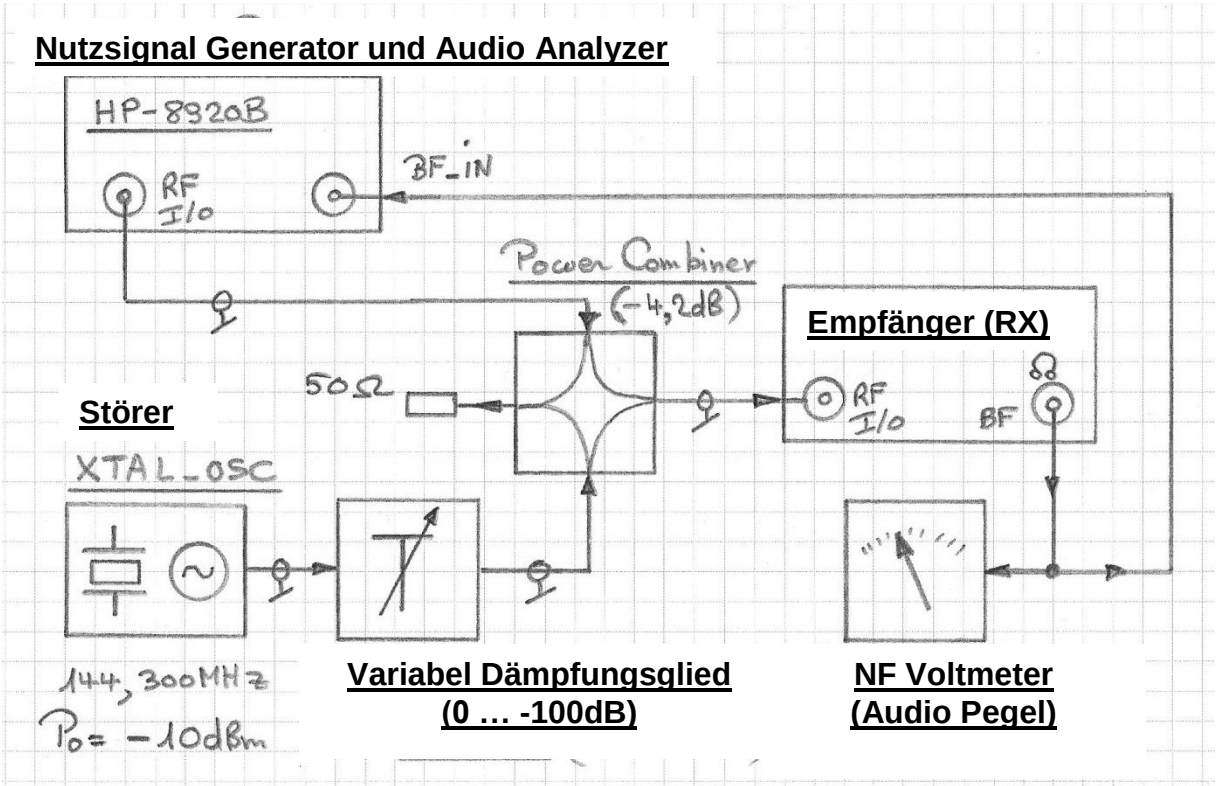

Bild 2: Schema des Messsystems für die Empfänger

Messung der Empfänger-Empfindlichkeit

Sie wird ohne Störsignal gemessen. Der Empfänger wird auf eine Frequenz im SSB Band gestellt (144,250 – 144,280MHz). Ohne Signal am Empfängereingang, regelt man zuerst das Audio-Volumen des Empfängers, um einen Rauschpegel von 0dB (Entsprechend 100mV) am NF Voltmeter zu erhalten.

Dann sendet der RF Generator des HP-9820B ein CW Signal geringer Amplitude auf der Empfangsfrequenz (Pegel: $P_{RF} = -130dBm \cdots -100dBm$). Dabei wird ein Ton am Audioausgang produziert. Sodann stellt man die Amplitude des RF Signals so ein, dass ein um 10dB höherer Audio Pegel als der Rauschpegel entsteht. Das SNR des empfangenen Signals ist dann:

$$SNR = \frac{S+N}{N} = 10dB$$

S = Audio Pegel mit RF Signal am Eingang
N = Audio Pegel ohne RF Signal (Rauschpegel)

Das Rauschen am Empfängereingang (Empfindlichkeits-Schwelle) wird wie folgt berechnet: $P_{NOISE}(RX-IN) = P_{RF}(HP-8920B) - 9{,}5dB - 4.2dB$
In dieser Formel sind die 9,5dB mit dem SNR=10dB verknüpft; Die 4,2dB kompensieren die Dämpfung des „Power-Combiners“ (siehe Bild 2).

Signal Pegel am HP-8920B für SNR = 10dB	-124.5	[dBm]
Verluste durch „Power-Combiner“ und Kabel	-4.2	[dB]
Korrektur Faktor entsprechend SNR = 10dB	-9.5	[dB]
Äquivalentes Eingangsrauschen des Empfängers	**-138.2**	**[dBm]**

Tabelle 1: Berechnung der Empfindlichkeit des FT-736

Der Pegel des Eingangsrauschens wird später benutzt, um die Dynamik des Empfängers zu berechnen.

Widerstandsfähigkeit gegenüber Störsignalen

In einem Empfänger hat ein starkes Signal auf einer Nachbarfrequenz eine Verminderung der Empfangsempfindlichkeit zur Folge. Als Ursache sind zwei Mechanismen verantwortlich:

1. Erhöhung des Rauschens auf der Empfangsfrequenz.

2. Reduzierung des Pegels des Eingangssignals durch nicht lineare Effekte im Empfänger.

Beide Effekte können sich kombinieren. Wir haben aber festgestellt, dass die Erhöhung des Rauschens der Hauptverursacher ist.

Die Erhöhung des Rauschens wird durch die sogenannte gegenseitige Mischung verursacht.

Ein Oszillator erzeugt Rauschen links und rechts seiner Frequenz; Der Pegel dieses Rauschens nimmt ab, je weiter man sich von der Oszillatorfrequenz entfernt. Diese Abnahme erfolgt in der Regel mit $1/\Delta f^2$, wobei Δf der Frequenzoffset zur Oszillatorfrequenz ist.

Das Seitenrauschen des Empfangs-VFO kreiert zusammen mit dem Signal auf einer benachbarten Frequenz (In der Messeinrichtung mit dem Signal eines Quarzoszillators) ein Mischprodukt (Rauschen), das in den Empfangskanal fällt und den Empfang stören kann.

Wenn der Pegel des benachbarten Senders zunimmt, nimmt das Rauschen im Empfangskanal proportional zu, was das Signal/Rausch Verhältnis (SNR) weiter verschlechtert. Dieses Rauschen nimmt jedoch mit zunehmendem Frequenzabstand ab. Eine Verdoppelung des Frequenzoffsets bewirkt im Allgemeinen eine 6dB Verbesserung des Signal/Rausch-Abstandes.

Beispiel:
In einem Überlagerungsempfänger wird das Signal von der Antenne auf eine niedrigere Zwischenfrequenz (ZF) umgesetzt (Bild 3). Auf der ZF arbeiten schmale Band pass-Filter, die für die Selektivität des Empfängers zuständig sind.

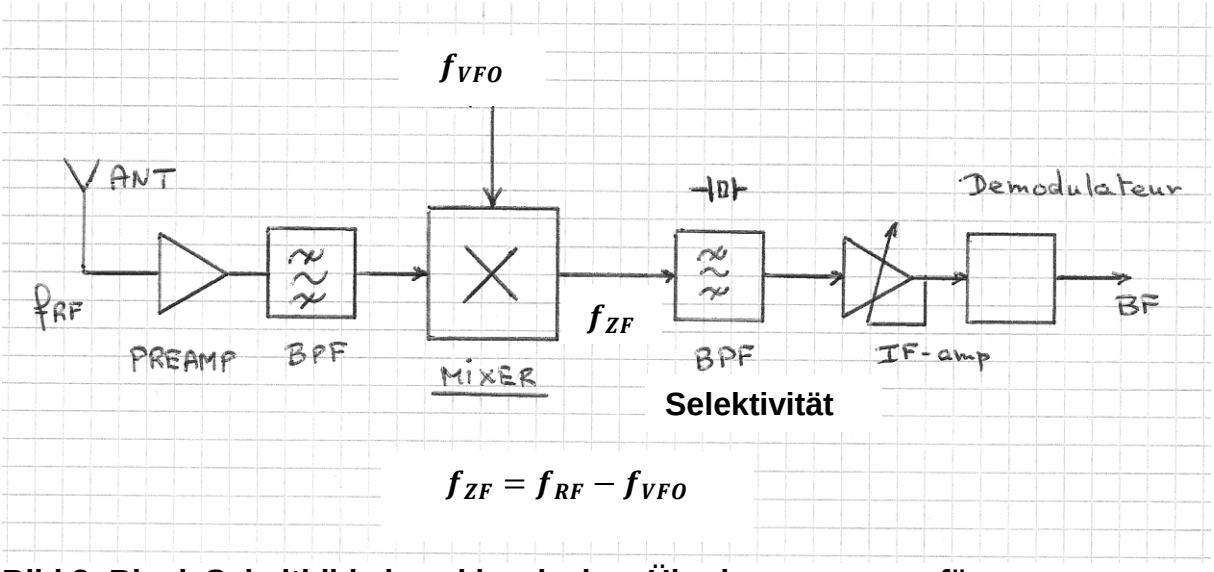

Bild 3: Block Schaltbild eines klassischen Überlagerungsempfängers

Die Umsetzung auf die ZF Frequenz wird durch einen Mischer (MIXER) durchgeführt. Ein solcher Mischer ist eine nicht lineare Schaltung, die das Antennensignal durch das VFO Signal moduliert.

Bild 4 zeigt den Vorgang im Frequenzbereich. Die Signale 1,2 und 3 auf Frequenzen f_1, f_2 und f_3 werden auf tieferen Frequenz-Signale $f_1' = f_1 - f_{VFO}$, $f_2' = f_2 - f_{VFO}$ und $f_3' = f_3 - f_{VFO}$ umgesetzt.

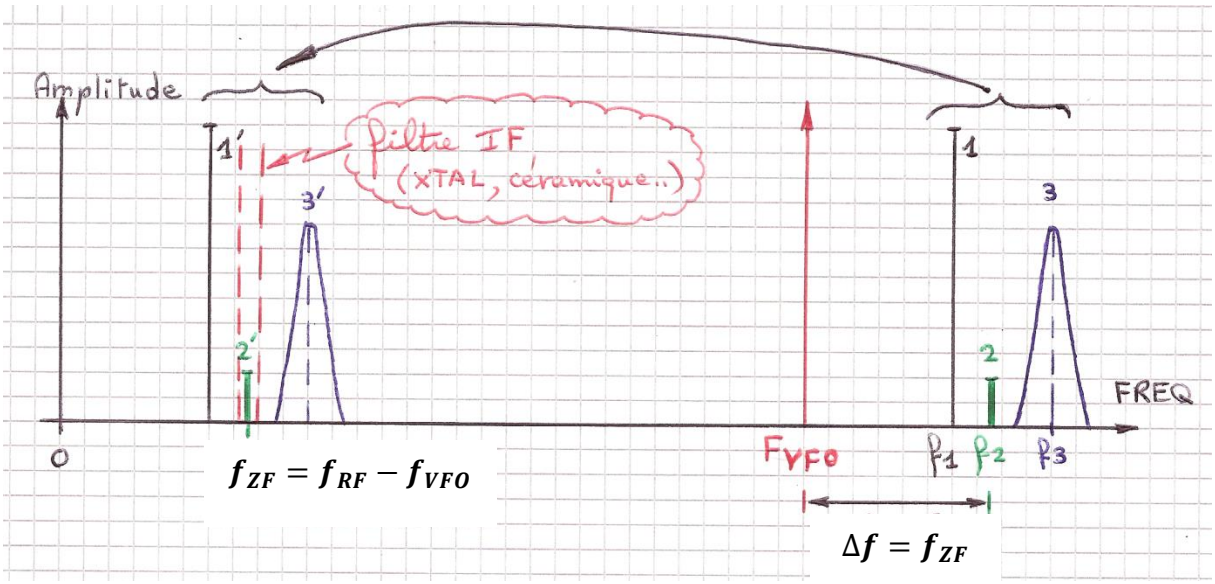

Bild 4: RF → ZF Umsetzung. Das VFO-Signal ist sauber.

Bei Bild 4 fällt das schwache (DX) Signal auf der Zwischenfrequenz $f_2' = f_{IF}$ in das Durchlassband des ZF-Filters. Die nebenstehenden Signale bei f_1' und f_3' sind ausser des Filters. Sie stören den Empfang des kleinen Signals nicht.
Alle drei Ausgangssignale des Mischers weisen das gleiche Spektrum auf wie an der Antenne.

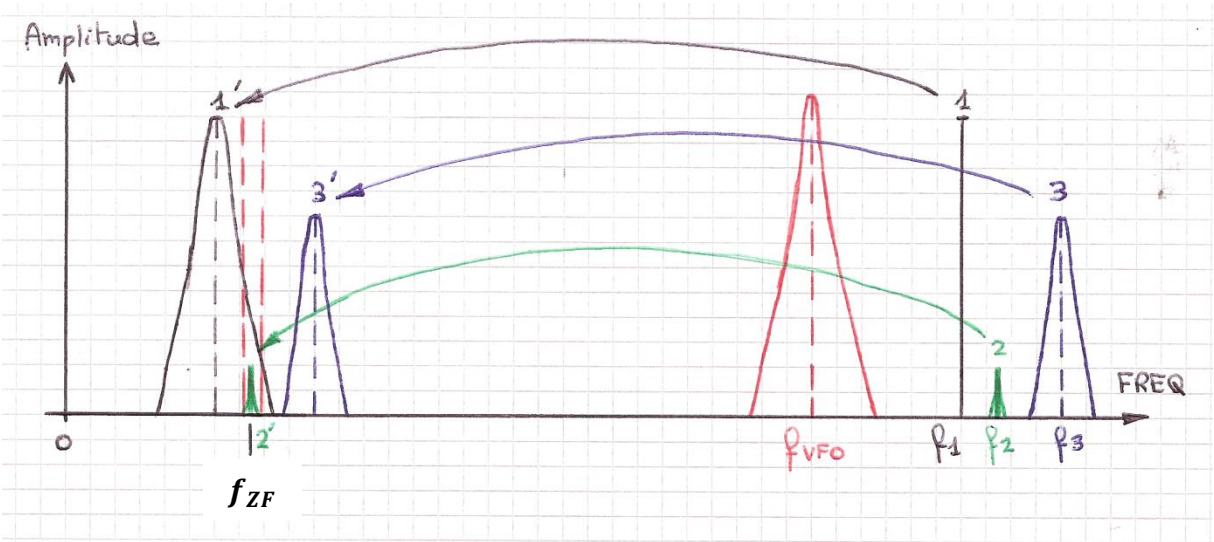

Bild 5: RF → ZF Umwandlung. Das VFO Signal ist verrauscht.

Bild 5 stellt den gleichen Ablauf mit einem verrauschten VFO Signal dar. Das Spektrum des VFO Signals ist jetzt breit. Die Signale bei den Frequenzen f_1', f_2' und f_3' werden durch das Rauschen des VFO moduliert. Das Spektrum des starken Signals (Nr. 1) ist jetzt breiter. Ein Teil seines Spektrums fällt nun in das Durchlassband des ZF-Filters. Das Seitenrauschen des VFO hat zusammen mit einem sauberen Antennen Signal (Nr. 1), ein Mischprodukt (Nr. 1‘) kreiert, dessen Seitenrauschen im Durchlassband des ZF-Filters fällt und den Empfang des kleinen DX Signals verhindert.

Die Messmethode

Das Schema des Messsystems ist in Bild 2 dargestellt. Als Störquelle benutzten wir einen Quarzoszillator, der auf 144.300MHz zentriert ist. Ein Quarzoszillator weist ein geringes Seitenrauschen aus. Dank seiner hohen Güte ($Q \approx 50000$) filtert der Resonator (Quarz) des Oszillators das thermische Rauschen weg. Im Vergleich dazu, hat der LC Resonator eines VFO eine wesentlich kleinere Güte von zirka 50. Da die spektrale Rauschdichte eines Oszillators umgekehrt proportional zum Q-Faktor ist ($P_{NOISE} \propto 1/Q$) ist in der Regel das Rauschen eines XTAL-Oszillator bei gleichem Frequenzoffset um 30dB besser als der eines LC-VFO.

Die Messungen wurden mit dem Empfänger auf 144,280MHz und dann auf 144,250MHz gemacht (Mit Offsets von 20 bzw. 50kHz zum Störer). Dabei wurde das Rauschen am Audio Ausgang mit Hilfe des NF-Voltmeters gemessen. Zuerst stellten wir die Audio Signalamplitude auf „0dB“ des NF-Voltmeters (Eichung ohne Signal am RF-Eingang des Empfängers).

Dann schalteten wir das Störsignal ein (144.300MHz XTAL-OSC). Mit dem Dämpfungsglied erhöhten wir sodann die Amplitude des XTAL-Oszillators, bis das Rauschen am NF Eingang um 3dB erhöht wurde (Verdoppelung des Audio Rauschens) und notierten diesen so genannten Grenzwert des Störsignals ($P_{Interferer}(Noise\ Increase + 3dB)$).
Das von der Interferenz erzeugte Rauschen ist in diesem Moment gleich gross wie das Empfängerrauschen. Wenn man die Amplitude des Störsignals weiter erhöht, dann steigt die Amplitude des Audio-Rauschens ebenfalls. Ist das nicht der Fall, dann erfolgt gleichzeitig eine Kompression des Eingangssignals durch eine Nichtlinearität im Eingang des Empfängers.

Die Empfangsdynamik ist die Differenz zwischen der Grenz-Amplitude des Störers und dem äquivalenten Eingangsrauschen des Empfängers:

$$Dyn_{RX}(\Delta f) = P_{Interferer}(Noise\ Increase + 3dB) - P_{NOISE}(RX_IN)$$

Wir haben die Messung bei Offsets $\Delta f = 20kHz$ und $\Delta f = 50kHz$ durchgeführt.

Bei grösserem Frequenzoffset stellten wir fest, dass die Dynamik ebenfalls grösser wird (Eine höhere Störsignal-Amplitude wird notwendig um die gleiche Verschlechterung der Empfangsempfindlichkeit zu produzieren).

Beispiel: Messung der Störfestigkeit beim FT-736 und IC-202

Tabelle 2 und 3 zeigen die Messresultate. Beim FT-736 wird die Empfindlichkeitsverminderung durch Erhöhung des Rauschens produziert.

Frequenzoffset zum Störsignal	Erhöhung des Rauschpegel [dB]	Störsignal Pegel [dBm]	Empfangs Dynamik [dB]
20kHz	1	-45	
	2	-42	
	3	**-40**	**98dB**
	5	-37	
50kHz	1	-33	
	2	-30	
	3	**-28**	**110dB**
	3.5 (Kompression Start Am RF Eingang)	-24	

Tabelle 2: Messung der Störsignalfestigkeit des FT-736
(Äquivalentes Eingangsrauschen: $P_{NOISE}(RX_IN) = -138dBm$)

Beim IC-202 sieht es anders aus. Der VFO des IC-202 ist ein VCXO (Variable Controlled XTAL Oszillator), dessen Resonator ein Quarz ist. Der VCXO arbeitet auf einem kleinen Frequenzband von 200kHz; Er hat 2 Quarze: einen für das Band 144.0 – 144.2MHz, der zweite für den Bereich 144.2 – 144.4MHz. Dank der Quarze ist das VFO Signal rauscharm.

Ein Signal starker Amplitude bei 20 oder 50kHz Abstand verursacht dann keine Erhöhung des Rauschens, sondern eine Verminderung des SNR (Signal/Rausch-Verhältnis) durch eine Kompression des Nutzsignales im Empfänger.

Wir haben das SNR des NF Ausgangssignal mit dem HP-8920B gemessen. Der HP8920B lieferte am Empfänger-Eingang ein Signal auf der Empfangsfrequenz (144.28 bzw. 144.25MHz), dessen Amplitude $SNR = 10dB$ betrug. Wir erhöhten dann die Amplitude des 144.3MHz Störsignals, bis der SNR um 3dB sank ($SNR = 7dB$), und notierten den Grenzwert ($P_{Interferer}(SNR = 7dB)$).

Die Dynamik des Empfängers ist die Differenz zwischen dem Grenzwert des Störers und dem äquivalenten Eingangsrauschen des Empfängers:

$$Dyn_{RX}(\Delta f) = P_{Interferer}(SNR = 7dB) - P_{NOISE}(RX_IN)$$

Frequenzoffset vom Störsignal	SNR [dB]	Störer Signalpegel [dBm]	Empfangs Dynamik [dB]
20kHz	10	-34	
	7	**-30**	**107**
	5	-26	
	3	-22	
50kHz	10	-34	
	7	**-26**	**111**
	5	-22	

Tabelle 3: Messung der Störsignalfestigkeit des IC-202
(Äquivalentes Eingangsrauschen: $P_{NOISE}(RX_IN) = -137dBm$)

Entgegen dem FT-736 ist die Dynamik nicht viel grösser bei 50kHz im Vergleich zu 20kHz Abstand. Beide Geräte zeigen eine gleich gute Störsignalfestigkeit bei 50kHz Abstand. Dabei ist der IC-202 ein Portabelgerät, das nicht für gutes Störsignalverhalten optimiert wurde!

Messresultate von 17 Geräten

Die Tabelle 4 zeigt die Messresultate von 17 unterschiedlichen Geräten, die wir gemessen haben. Die Geräte sind in Funktion ihrer Empfangsdynamik bei 50kHz Frequenz-Offset sortiert.

Gerät	Bemerkung	Äquivalentes Rauschen am Empfänger Eingang [dBm]	Störsignal Pegel [dBm] bei Δf=50kHz Offset für eine Empfindlichkeit Verminderung von 3dB	Dynamik [dB] bei Δf=50kHz
OM-made	Ga-As Vorverst.	-140	-15	125
	J-Fet Vorverst.	-132	-5	128
IC-202 S	Standard	-137	-26	**111**
TS-790E	Vorverst. OFF	-131	-21	**110**
FT-736 R	Standard	-138	-28	**110**
IC-251-E	Standard	-136	-27	**109**
IC 275	ATT. OFF	-138	-32	**106**
TS-700	Standard	-139	-34	105
K3 + TRCVR	Vorverst. OFF	-137	-36	101
TS-2000	Vorverst. **+ ATT ON**	-123	-23	100
KX3 + TRCVR	Vorverst. OFF	-128	-30	98
FT-857	Standard	-136	-37	99
FT-897	Standard	-138	-40	98
IC-7000	Vorverst. OFF	-130	-35	95
IC-7400	Vorverst. OFF	-131	-36	95
FT-225-RD	Standard	-136	-42	94
FT-991-A	Standard	-138	-44	94
IC-910	Vorverst. ON	-138	-47	91

Tabelle 4: Störsignalfestigkeit und Dynamik

Die Empfangsempfindlichkeit (äquivalentes Eingangsrauschen) ist nicht entscheidend, weil üblicherweise ein Empfangs-Vorverstärker am Antennenmast platziert wird. Eine hohe Empfindlichkeit am Transceiver ist dann nicht notwendig und könnte aus der Sicht der Störsignalfestigkeit kontraproduktiv werden. Wenn der Vorverstärker einen +20dB Gewinn hat, dann genügt eine Empfindlichkeit am RX von -130dBm. Wenn der RX eine -138dBm Empfindlichkeit aufweist, dann sind +10dB Gewinn am Vorverstärker genug. Zuviel Gewinn vermindert die Störsignal-Festigkeit, da alle Signale verstärkt werden und das Rauschen am Eingang nicht kleiner als das Antennenrauschen (zwischen -135 … -140dBm) sein kann…

Den besten Empfang haben der IC-202S, TS-790E, FT-736R, IC-251E und der IC-275. Dabei ist aber zu bemerken, dass der TS-790E zu viel breitbandiges Rauschen beim Senden erzeugt, und dass der FT-736R beim Senden in CW (nicht in SSB) auch zu viel Rauschen sendet (Siehe „Messungen der Sender“ im HB-Radio 3/2018).

Die Resultate sind in Bild 3 und 4 dargestellt. Bild 3 zeigt die Störsignalfestigkeit und Bild 4 die Dynamik in Funktion des Frequenzoffsets.

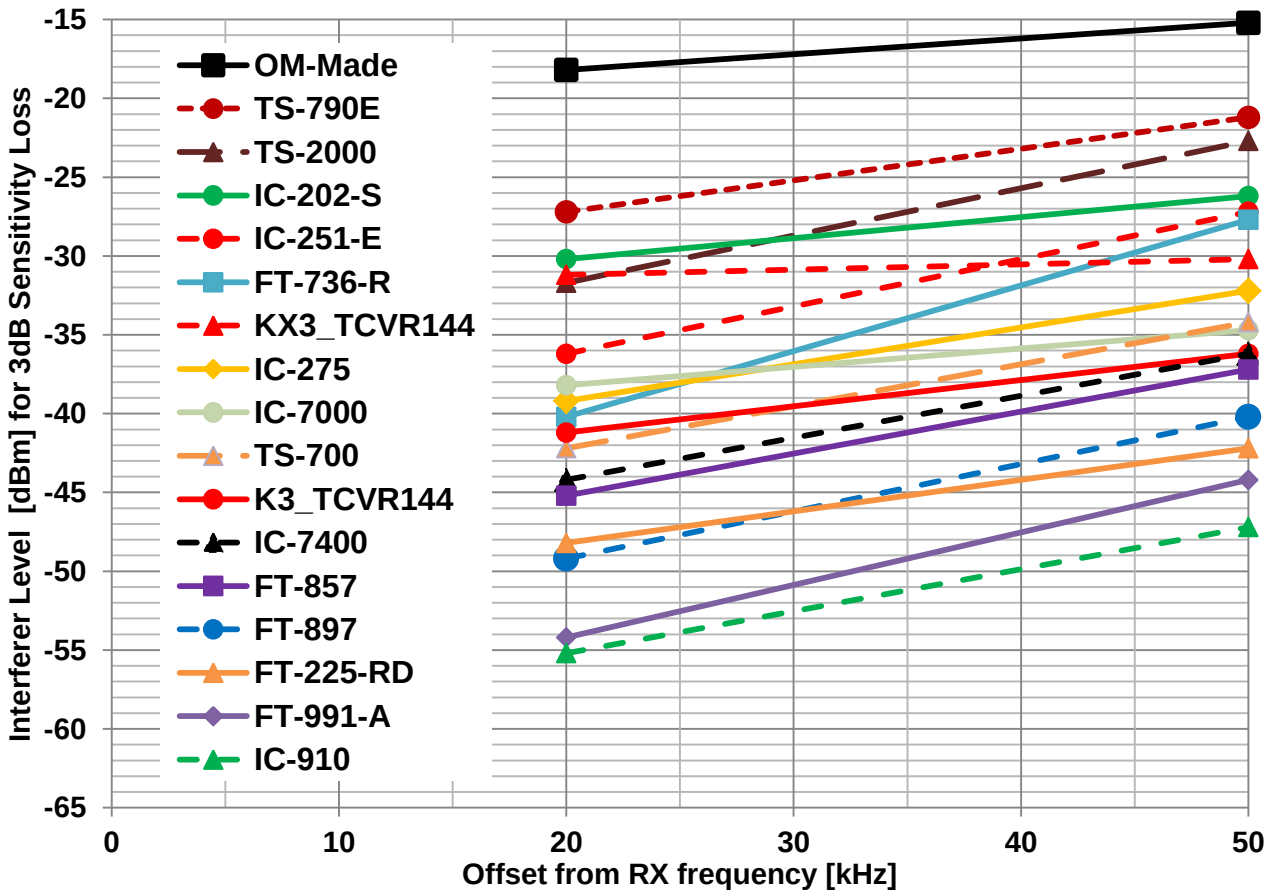

Bild 3: Störsignalfestigkeit in Funktion der Frequenz

Geräte, die in Bild 3 als gut erscheinen, werden in Bild 4 herabgestuft. Der Grund dafür liegt an der Empfindlichkeit: Ein Empfänger mit geringer Empfindlichkeit (-130dBm oder tiefer) hat de facto ein besseres Störsignal-Verhalten, da die Verstärkung seines RF-Eingangs kleiner ist. Bei der Kalkulation der Dynamik wird die Empfindlichkeit berücksichtigt.

Beispiel: In Bild 3 sieht die Kombination KX3+TCVR 10dB besser aus als K3+TCVR. Aber in Bild 4 sind beide Geräte auf dem gleichen Niveau, da die Empfindlichkeit des KX3 9dB geringer ist, als die vom K3.

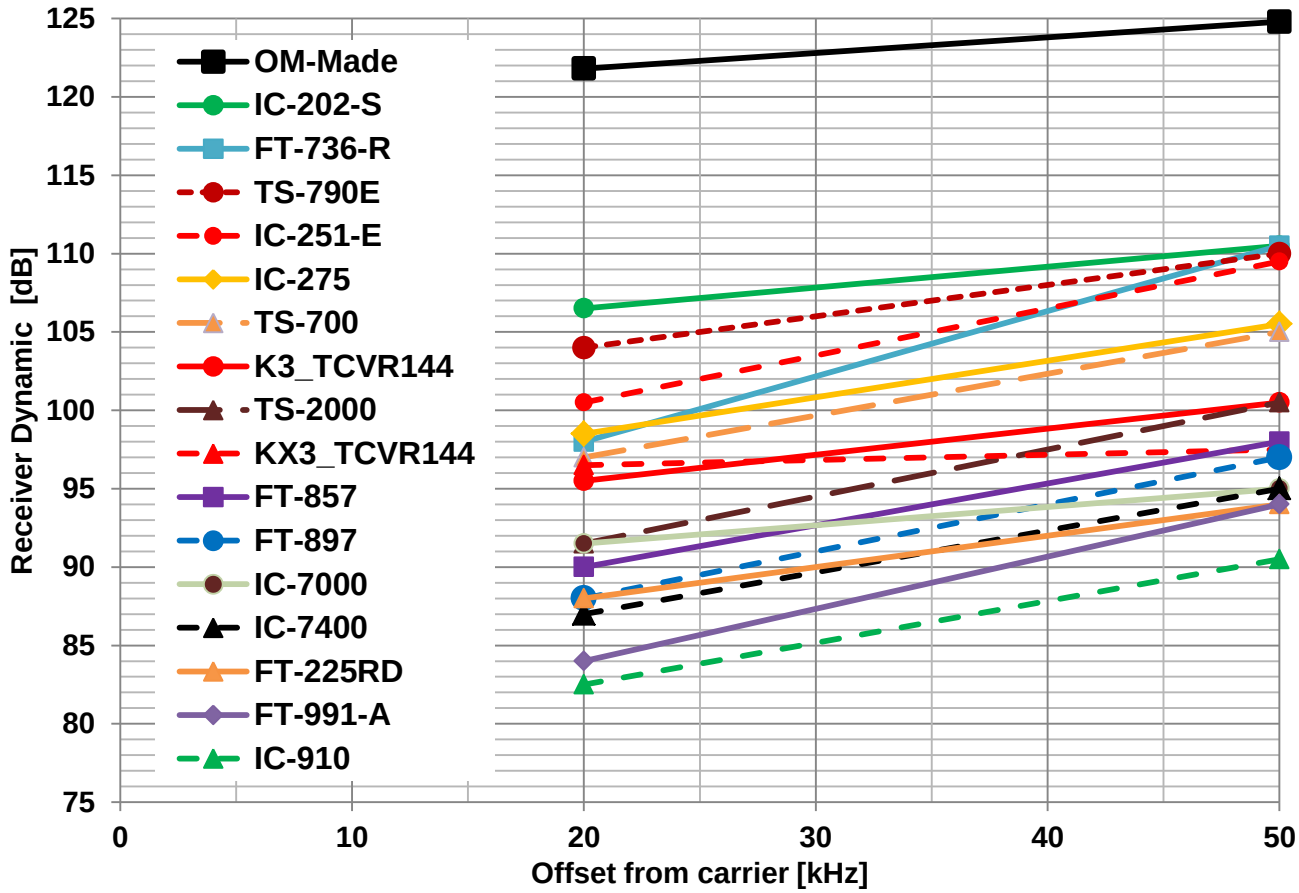

Bild 4: Empfangsdynamik in Funktion der Frequenz

Schlussfolgerung

Die Störsignalfestigkeit ist ein wichtiger Parameter für Empfänger im 144MHz Contest-Betrieb von hohen und freien Standorten aus. Die Empfangsdynamik wird dabei oft durch das Seitenrauschen des eigenen Empfänger VFO begrenzt. In diesem Fall werden benachbarte Signale schlecht bewertet, obwohl sie sauber sind.

Um die Empfangsdynamik zu optimieren, wird empfohlen, den Gewinn des Antennen- Mastvorverstärkers nicht zu hoch anzusetzen. Nur gerade hoch genug, um die Verluste des Kabels zu kompensieren und das Rauschen des Empfangssystems kleiner als das Antennen-Rauschen zu machen.

Dank: Herzlichem Dank an Anton Bärtschi HB9ASB für die Hilfe bei der deutschen Übersetzung