QRM im Kontest?
Meßergebnisse von 2 m-Stationen

Wolf-Henning Rech, DF9IC, Eisinger Str. 36/2, 75245 Neulingen,
mailto: whrech@web.de

1 QRM im Kontest - muß das ein?

Der Autor hat seine erste Amateurfunklizenz im August 1977 erhalten und das erste Mal im September 1977 von einem exponierten QTH aus einen VHF-Kontest miterlebt - mit sehr schwachen Signalen im Rauschen, aber auch starkem QRM durch andere Stationen in der Nähe. Das ist nun fast 30 Jahre her, in denen sich viele Bereiche der Amateurfunktechnik erheblich weiterentwickelt haben, denken wir nur an den Mikro- und Millimeterwellenbereich; aber die QRM-Situation bei VHF-Kontesten hat sich leider nicht grundlegend verändert.

Auch dieser Bericht wird dem nicht abhelfen können, er soll aber das Wissen um die Ursachen der geschilderten Probleme erneut darstellen und in Erinnerung rufen und wenigstens Ansätze zur Abhilfe aufzeigen. Für die Amateurfunkgeräteindustrie ist das Großsignalverhalten der angebotenen 144-MHz-Transceiver leider kein wichtiges Thema, und für viele Funkamateure außerhalb der europäischen Ballungsräume auch nicht. Deshalb und weil andere Eigenschaften für den kommerziellen Erfolg wichtiger sind, die dazu konträr stehen, z. B. Breitband-Empfangsbetrieb und Integration vieler Bänder in ein Gerät, können gute VHF-Kontest-Transceiver nicht einfach beim Händler bestellt werden - zur Realisierung ist eigene Kreativität gefragt.

Bevor über Maßnahmen nachgedacht werden kann, muß man zunächst der Stand der Technik festgestellen. In der Literatur [1][2][3][4][5] gibt es eine ganze Reihe von Untersuchungen und Berichten, die sich aber manchmal in Einzelpunkten so offensichtlich widersprechen, daß eigene Messungen sinnvoll erschienen.

Solche Messungen sind leider nicht ganz einfach durchzuführen; ein auch nur mittelmäßiger Sender erzeugt weniger Seitenbandrauschen als der LO eines Spektrumanalysators der Oberklasse, so daß dieser zur Messung ungeeignet ist. Hochwertige Meßsender sind zwar schon etwas besser, aber nicht gut genug, um wirklich gute Empfänger zu charakterisieren. Der erste Schritt ist daher der Aufbau einer eigenen Meßtechnik, die zwar nur für 144 MHz geeignet ist, dort aber für den Zweck ausreichend gut.

Nachdem einfache geeignete Testinstrumente zur Verfügung standen, hat der Autor andere Funkamateure mit ihren Stationen eingeladen und einige der kritischen Parameter von Sendern und Empfängern gemessen. Über die Methodik und die Ergebnisse dieser Messungen wird hier ebenfalls berichtet.

Um die in der Überschrift gestellte Frage zu beantworten: nein, es müßte nicht sein. daß „große“ Kontesstationen in räumlichem Abstand von 10 km oder mehr sich gegegenseitig den Betrieb erschweren. Aber es ist noch ein weiter Weg bis zum (fast) QRM-freien Kontest.

2 Starke und schwache Signale im 2-m-Band und bei Kurzwelle

Bild 1 zeigt die Großsignalsituation am Standort des Autors während des Maikontests 2005. Die eingetragenen Stationen gehören jeweils zu den ersten zehn in der Wertung, mit guten Standorten und deutlichem Antennenaufwand. Die verwendete Empfangsantenne ist eine 2x11-Element-Yagigruppe mit einem azimuthalen Öffnungswinkel von etwa 40° an einem guten VHF-Standort ohne Vorverstärkung und mit 1,5 dB Kabeldämpfung bis zum Spektrumanalyzer (R&S FSP30).

Für dieses Bild wurde die Antennenanlage in Schritten von 30° gedreht und dann jeweils für ca. 20 s der Analysator mit „MAX HOLD“-Funktion zur Messung eingesetzt, so daß alle regelmäßig auftretenden Signale erfaßt sind. Die Spektrogramme der verschiedenen Antennenrichtungen sind in diesem Bild übereinandergeschrieben dargestellt. Schwache Signale gehen natürlich im additiven und Phasenrauschen des Analyzers unter.

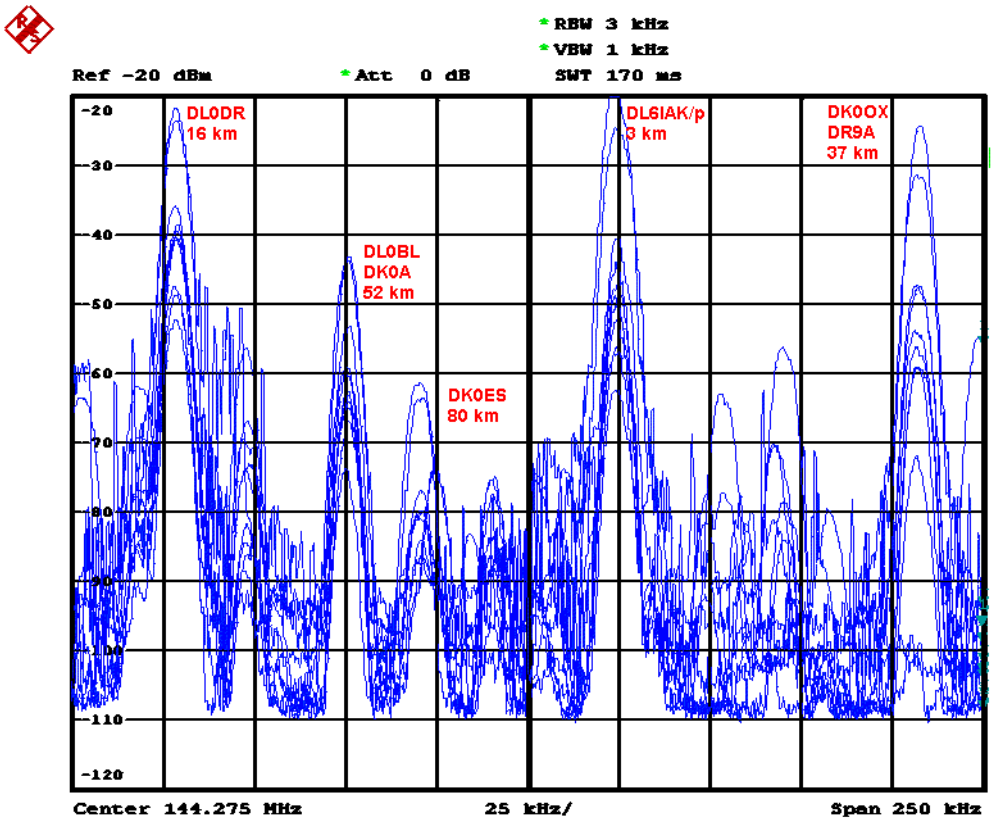


Bild 1 Belegung des 2-m-SSB-Bands am Standort des Autors im Maikontest 2005

Es sind drei sehr starke Signale erkennbar, DK0OX mit -25 dBm, DL0DR mit -22 dBm und DL6IAK/p mit mehr als -20 dBm (bis zu -11 dBm bei aufeinandergedrehten Antennen); letzteres entspricht einem Abstand zum Rauschen bei 290 K und 2,5 kHz Bandbreite von fast 130 dB. Der Rauschflur eines SSB-Empfängers mit 0 dB Rauschzahl liegt bei -140 dBm. Zu diesen drei Stationen besteht eine Fast-Sichtverbindung, nur durch einige Bäume unterbrochen.

Allerdings treten diese sehr starken Signale nicht bei gleicher Antennenrichtung auf, wie Bild 2 zeigt. Wenn die Antenne auf eine der Stationen ausgerichtet ist, sind die anderen beiden typischerweise 15....30 dB schwächer.

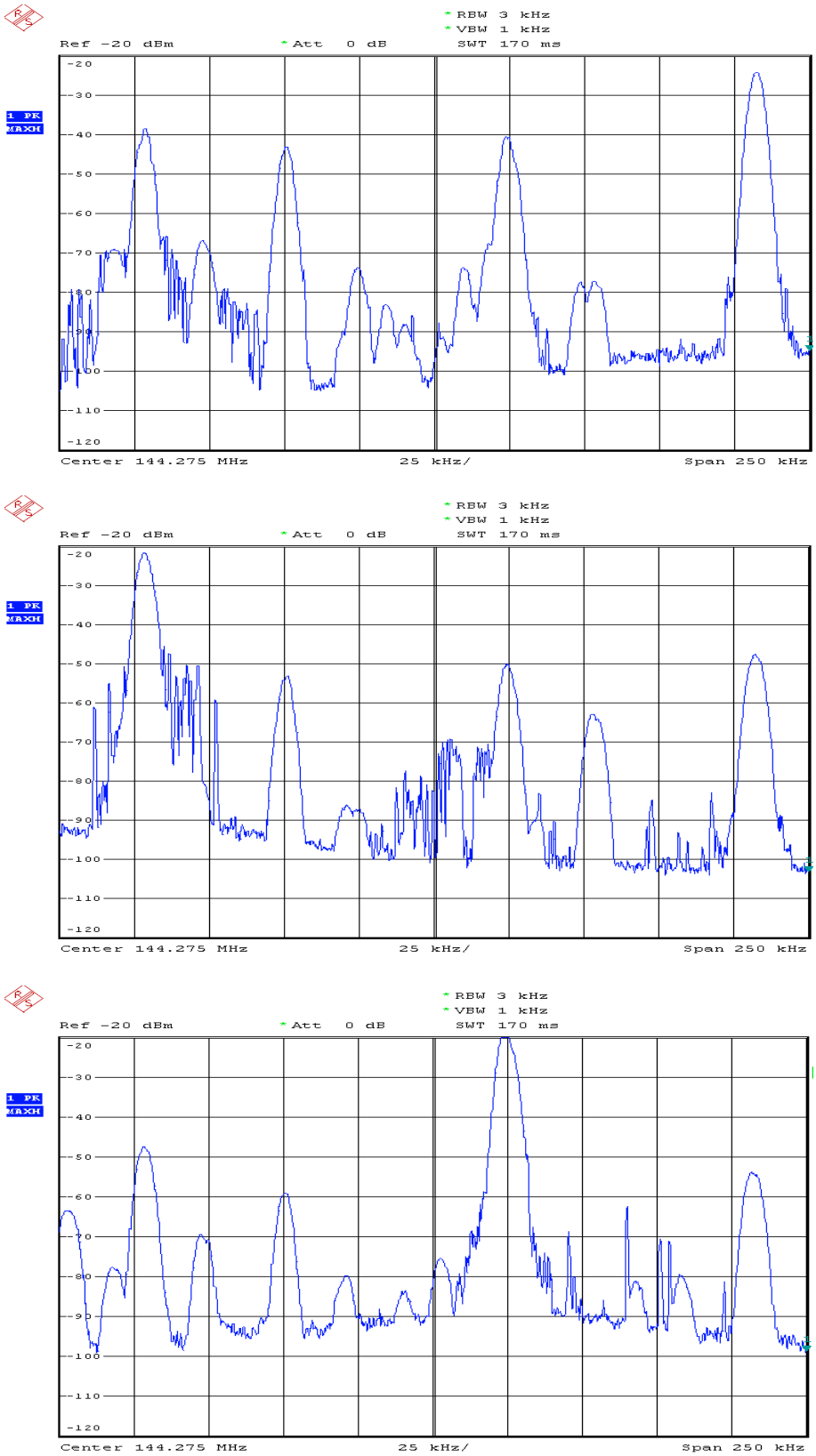


Bild 2 Belegung des 2-m-SSB-Bands am Standort des Autors im Maikontest 2005 in Abhängigkeit der Antennenrichtung; oben: 200° in Richtung zu DK0OX; Mitte: 260° in Richtung zu DL0DR; unten: 350° in Richtung zu DL6IAK/p

Diese Situation ist relativ typisch für das 2-m-Band mit hoher Aktivität; ein oder zwei sehr starke Signale dominieren alle anderen, die deshalb für Großsignalbetrachtungen dann auch beinahe vernachlässigt werden können.

Zum Vergleich zeigt zwei Spektren aus dem unteren Kurzwellenbereich, die an der Station DL0MB gewonnen werden konnten, nämlich das 40-m-Band mit umliegenden Rundfunksendern an einer Ganzwellenschleife und das 160-m-Band einschließlich der oberen Hälfte des Mittelwellen-Rundfunkbands an einem inverted-vee-Dipol mit 2x40 m voller Länge. Bei letzterer Darstellung liegt der Referenzpegel bei 0 dBm statt -20 dBm.

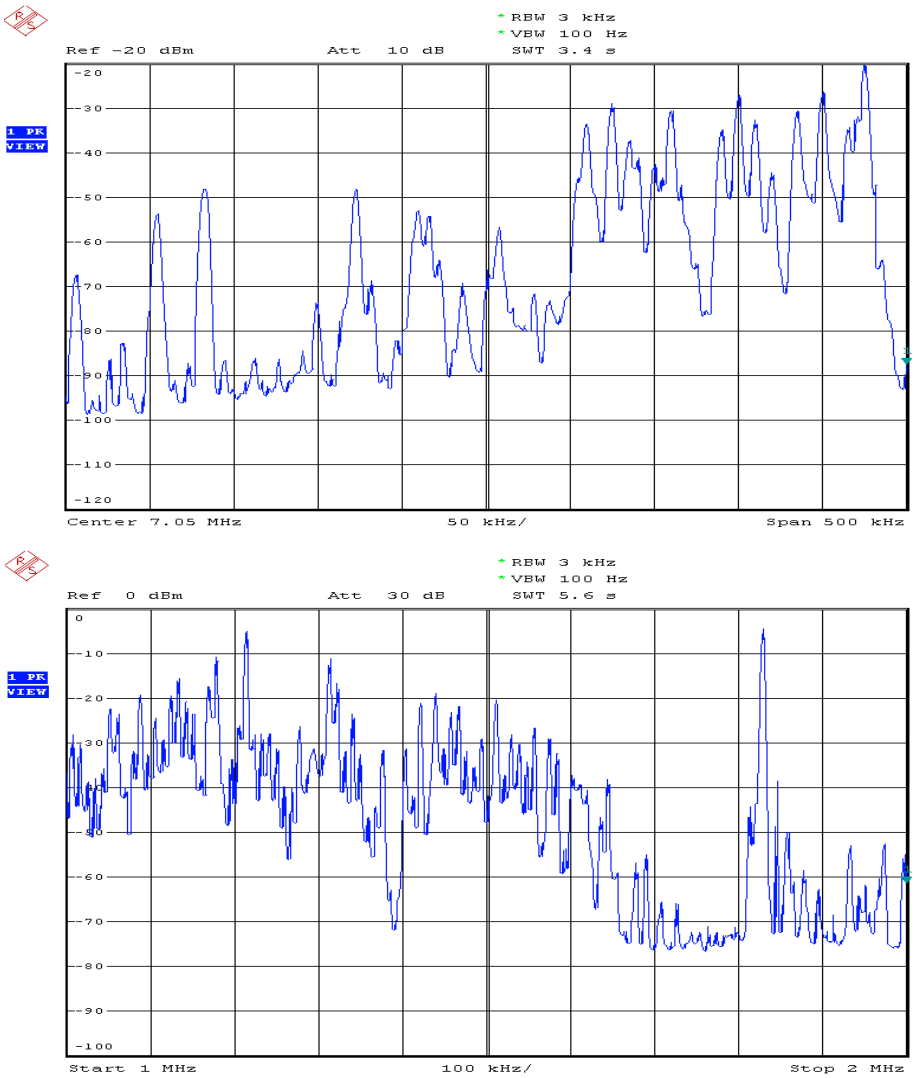


Bild 3 Signale im KW-Bereich, gemessen an der Antennenanlage von DL0MB (Clubstation des Daimler-Chrysler-Werks in Rastatt); oben: 40-m-Band und Umgebung; unten: 1...2 MHz mit Mittelwellenrundfunk und 160-m-Band.

Bei einem Vergleich fällt auf, daß sehr viel zahlreichere starke Signale auftreten, insbesondere Rundfunksender; die Amateursignale waren zum Meßzeitpunkt im Januar 2006 am Freitag abend ca. 22:00 UT, kurz vor Beginn des 160-m-Kontests im 40-m-Band nicht sehr stark mit max. -53 dBm, bei Rundfunksignalen bis -20 dBm. Im 160-m-Band ist ein extrem starkes Signal (-5 dBm) erkennbar, die Mittelwellensender erreichen teilweise die gleiche Signalleistung.

Allerdings ist zu bedenken, daß der Rauschpegel im unteren KW-Bereich an einer derartigen full-size-Antenne wesentlich höher liegen als in einer mit man-made-noise nicht zu sehr verseuchten Umgebung im VHF-Bereich - zum Zeitpunkt der Messung etwa 30...40 dB über dem thermischen Rauschen bei 290 K.

Damit ergibt sich, daß die Dynamikanforderungen an einen Kurzwellenempfänger durch eine größere Anzahl von Signalen bestimmt wird, von denen jedes einzelne aber „nur“ um etwa 80...100 dB über dem Antennenrauschen liegt. Im 2-m-Band sind hingegen meist nur ein oder zwei starke Signale entscheidend, die aber bis zu 110....125 dB stärker sind als das Antennenrauschen. Daraus resultieren unterschiedliche Anforderungen an den Empfänger, und deshalb ist ein brauchbarer KW-Empfänger nicht automatisch ein guter Nachsetzer für einen 2-m-Band-Transverter.

Alle Rauschpegel sind auf eine Bandbreite von 2,5 kHz (SSB) bezogen.

3 Intermodulation, Rauschen und Splatter

Ein Sender (TX) soll nur in dem vorgesehenen Frequenzbereich von ca. 2,5 kHz (bei SSB) Ausgangssignale erzeugen, ein Empfänger (RX) nur in dieser Bandbreite auf Signale reagieren. Das läßt sich durch Filter (im allgemeinen bei einer Zwischenfrequenz) mit genügend Selektionswirkung und lineare Signalverarbeitung in allen Stufen hinter (TX) bzw. vor (RX) diesem Filter erreichen.

Was sich so einfach anhört, ist leider nicht perfekt zu realisieren. Die nichtidealen Eigenschaften von Sendern und Empfängern und deren Einfluß werden in diesem Abschnitt beschrieben. Es handelt sich im einzelnen um

- mangelnde Selektion der Filter;
- nichtlineare Verzerrungen in Mischern, Verstärkern und auch passiven Elementen;
- additives Rauschen von Verstärkern;
- Seitenbandrauschen von Oszillatoren;
- transiente Effekte, die durch zeitweise Übersteuerung (ALC) zu zusätzlichen nichtlinearen Verzerrungen führen oder durch Modulation unter Umgehung der Filter (CW-Tastclicks) unerwünschte Spektralkomponenten erzeugen.

Bild 4 zeigt die Effekte im Überblick an der Stelle, wo sie entstehen und wirken.

3.1 Selektion

Filter in Sendern und Empfängern sollen sicherstellen, daß nur Signale im Nutzkanal gesendet bzw. demoduliert werden. Eine Unterdrückung der unerwünschten Signale um wenigstens 120 dB ist anzustreben.

Das gelingt mit einem einzelnen Quarzfilter nicht. Bei einfacheren alten Transceivern wie z. B. dem IC202 führt das zu einem Großsignalproblem speziell im Empfänger. Normalerweise besitzen Empfänger aber ein sogenanntes Roofing-Filter, das oft geometrisch weit genung vom Hauptfilter entfernt angeordnet ist, daß insgesamt eine Selektion in der gewünschten Größenordnung erreicht wird. Findet die Selektion zudem - wie auch schon seit langem üblich - bei zwei unterschiedlichen Zwischenfrequenzen statt, so ist das Problem

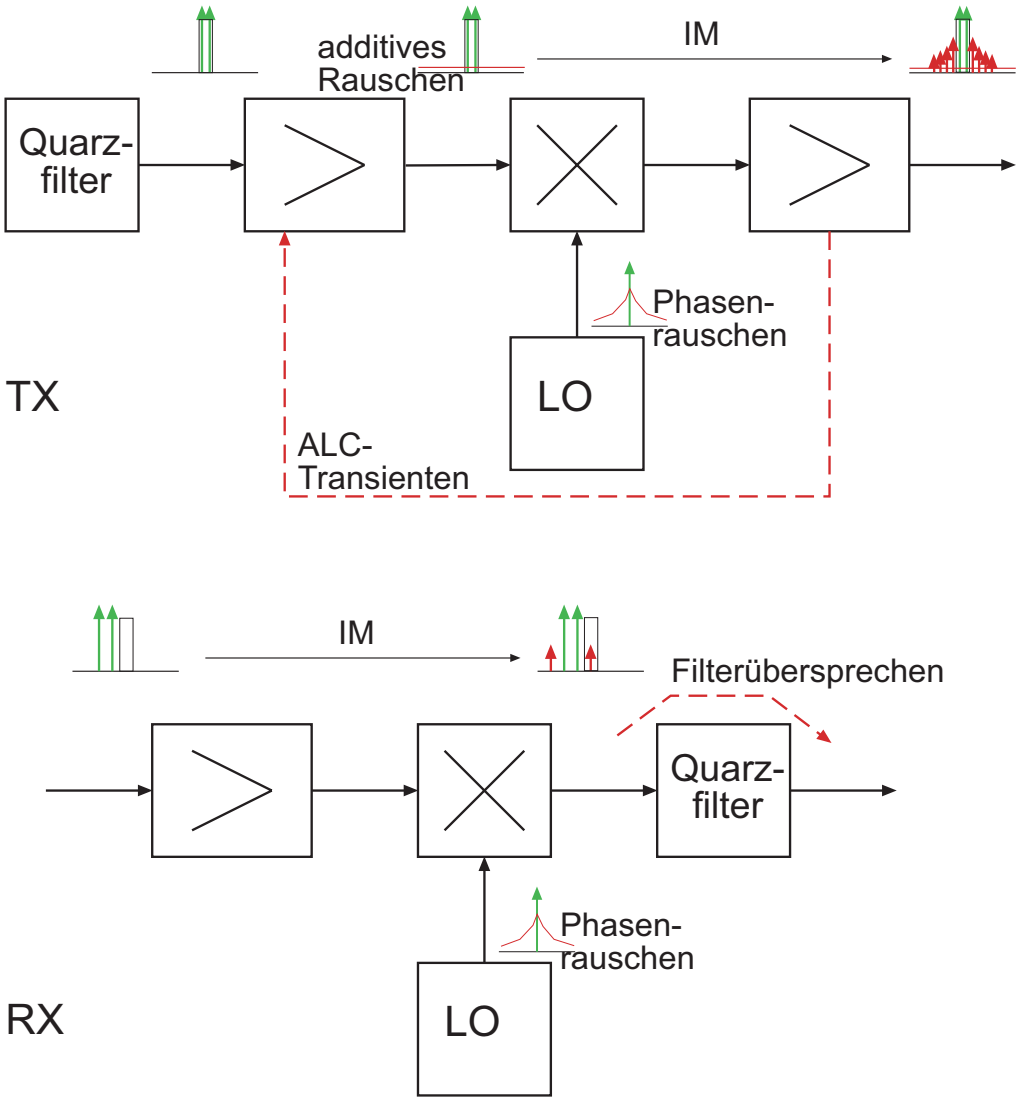


Bild 4 Schematische Darstellung der Großsignaleffekte im Sender (oben) und Empfänger (unten)

möglichen Übersprechens vom Eingang des ersten zum Ausgang des zweiten Filters vermieden.

Die Position dieser Filter im Pegelplan des Senders bzw. Empfängers ist von größerer Bedeutung. Insbesondere im Sender wird das letzte schmalbandige Filter oft bei zu kleinem Pegel betrieben, so daß das Rauschen der darauf folgenden Verstärkerstufe zur dominierenden Störgröße wird - ein vollkommen unnötiger Designfehler.

Die in KW-Kreisen derzeit gerne diskutierte Bandbreite des Roofing-Filters ist für 2-m-Anwendung unwesentlich, wenn der Pegelplan des Empfängers vernünftig ist und das endgültige Selektionsfilter bald folgt. Im Gegenteil verschlechtern zu schmale Roofing-Filter

die Möglichkeiten eines normalerweise zwischen Roofing- und Hauptfilter angeordneten Störaustasters.

ZF-DSPs in Verbindung mit einem guten Roofing-Filter und einem durchdachten Pegelplan sind gut geeignet, die Selektionsanforderungen zu erfüllen.

3.2 Intermodulation und Intercept Point (IP)

Intermodulation ist eine nichtlineare Verzerrung, die u. a. bei Großsignalaussteuerung von Verstärkern, also sowohl im Sende- wie Empfangsbetrieb, entstehen kann. Dennoch müssen die beiden Fälle deutlich unterschieden werden.

Beim Empfänger liegen auch die stärksten Signale noch wesentlich unterhalb der Sättigungsleistung des Eingangsteils. Dann spielen nur die Intermodulationsprodukte dritter Ordnung eine Rolle. Die Beschreibung ist durch die Angabe des Intercept-Punkt (IP3) ausreichend möglich, wobei dieser vom Trägerabstand der beiden störenden Signale abhängt. Wegen der geringen Zahl sehr starker Signale im 2-m-Band spielt der IP nur eine geringere Rolle, da nur wenige Frequenzen von den Störungen betroffen sind. Der intermodulationsfreie Dynamikbereich typischer Transceiver für 2,5 kHz Bandbreite liegt bei 85...95 dB, d.h. zwei Signale müssen diesen Pegel erreichen, um zwei weitere Frequenzen dadurch zu blockieren; die Frequenzen dieser IM-Produkte liegen aber u. U. schon außerhalb des SSB-Bands. Erst bei Verwendung eines zusätzlichen Mastvorverstärkers machen sich Intermodulationen stärker bemerkbar, 15 dB zusätzliche Verstärkung reduzieren den intermodulationsfreien Dynamikbereich um 10 dB. Der IP des Vorverstärkers selbst spielt dafür in der Regel keine Rolle.

Beim Sender sind die Intermodulationsverzerrungen viel stärker und für einen Teil des „Splatter“ verantwortlich. Der Leistungsverstärker wird bis in den Bereich der Sättigungsleistung ausgesteuert, dadurch steigen auch Intermodulationsprodukte sehr hoher Ordnung auf einen störenden Pegel an. Für die belegte Bandbreite eines starken Signals sind IM-Verzerrungen niedriger (3., 5., 7.) Ordnung, wie sie in Testberichten zum Teil gemesen werden, irrelevant; erst die Verzerrungen der Ordnungen einer Größenordnung von 50 bis 100 erreichen die gewünschte Absenkung von 100 dB und mehr. Besonders lineare Verstärker z. B. im A-Betrieb sind bei hohen Sendeleistungen sehr unwirtschaftlich, Linearisierungsverfahren mit so hoher Dynamik kaum beherrschbar.

3.3 Additives Rauschen

Beim Empfänger wird das additive Rauschen der Verstärkerstufen durch deren Rauschzahl und das des Gesamtempfängers durch die Rauschzahl der Kettenschaltung aller Stufen bestimmt. Es ist an sich kein Problem, eine ausreichend niedrige Rauschzahl von <2 dB zu erreichen, nur sollte darauf geachtet werden, daß dies mit dem bestmöglichen Pegelplan, also nicht mehr als der nötigen Verstärkung an der jeweiligen Stelle geschieht. Dazu gehört, daß ein Mastvorverstärker durch Rücknahme der Verstärkung im Empfänger berücksichtig wird und die gesamte Duchgangsverstärkung eines Transverters der Rauschzahl des nachfolgenden KW-Transceivers angepaßt wird.

Viel zu selten diskutiert wird das additive (breitbandige) Rauschen der Sender. Dessen Hauptverursacher ist die erste Verstärkerstufe nach dem letzten schmalbandigen Filter; hier sollte der Signalpegel geräteintern ausreichend hoch gewählt werden. Das ist fast durchweg nicht der Fall. Verschlimmert wird dieses Breitbandrauschen noch durch Reduzieren der

Sendeleistung, wenn diese Reduktion - wie meist üblich, aber völlig unverständlich - vor dem Quarzfilter vorgenommen wird und dadurch das Breitbandrauschen auf dem hohen Pegel erhalten bleibt.

3.4 Seitenbandrauschen von Oszillatoren

Oszillatoren erzeugen keine perfekten Ausgangssignale mit beliebig kleiner spektraler Breite, sondern das reale Oszillatorsignal ist rausch-phasenmoduliert und besitzt daher Rauschseitenbänder. Diese führen beim Sender unmittelbar zu Nebensignalen und beim Überlagerungsempfänger durch „reziprokes Mischen“ zu einer dazu äquivalenten Nebenempfangsstelle.

Rauscharme Oszillatoren arbeiten mit hoher Oszillatorleistung und möglichst schmalbandigen Schwingkreisen, also mit hoher Güte bei möglichst niedriger Schwingfrequenz. KW-Transceiver mit niedriger ZF sollten hier besser abschneiden als solche mit hoher, diese wiederum wenig besser als 2-m-Transceiver.

Ein weiter Abstimmbereich führt zu niedrigeren Schwingkreisgüten und erfordert kleine Oszillatorleistungen, um die stark gekoppelten Kapazitätsdioden nicht zu weit auszusteuern. So hat z. B. das IC275E getrennte VCOs für das Amateurfunkband und für den Breitbandempfang, um eine Beeinträchtigung zu reduzieren.

Die PLL kann je nach Ausführung das Phasenrauschen erheblich verschlechtern, muß das aber nicht notwendigerweise. Eine Verbesserung ist hingegen daduch im relevanten Frequenz- und Pegelbereich kaum zu erreichen.

Quarzoszillatoren können sehr geringes Phasenrauschen erreichen, insbesondere in Trägernähe auf Grund der hohen Schwingkreisgüte. Leider begrenzt die sehr geringe Abstimmbarkeit des Oberton-Quarzoszillators deren Einsatz. Ideale Frequenzvervielfacher erhöhen das Seitenbandrauschen um $20 \cdot \lg N$, d. h. 6 dB/Verdopplung.

3.5 Transiente Effekte

Hierzu zählen Störungen, die sich erst bei Modulation bzw. Tastung oder dem Ein-/Ausschalten bemerkbar machen. Letztere sind in ihrer Auswirkung weniger schlimm und bleiben meist ohne Beachtung.

Tastclicks bei CW-Modulation können durch unzureichende Filterung in der Tastschaltung entstehen, dann ist eine Nachbesserung relativ einfach.

Oftmals ist aber eine zu schnell und stark regelnde ALC sowohl bei CW als auch bei SSB der Hauptgrund für modulationsbedingte Signalüberschwinger. In den Tast- bzw. Sprechpausen erhöht der Sender seine Verstärkung so weit (oft um bis zu 10 dB), daß das nächste starke Signal den Ausgangsverstärker total übersteuert und damit alle Maßnahmen der Filterung in der Signalaufbereitung zunichte macht. Auch die dann schnell erfolgende Rückregelung der Verstärkung ist eine Störmodulation. Je nach Regelgeschwindigkeit können diese Störungen das gesamte Schmalbandsegment oder einen großen Teil davon umfassen.

Eine Deaktivierung einer solchen ALC ist fast immer die bessere Lösung. In komplexen Setups muß der Sender sowieso individuell eingepegelt und dies regelmässig überprüft werden, eine automatische Verstärkungsregelung ist da eher von Nachteil.

3.6 Wie machen sich die Effekte bemerkbar?

Zur einfachen Selbstdiagnose einige Hinweise, wie sich die genannten Effekte am Lautsprecher eines Empfängers äußern:

3.6.1 Mangelnde Selektion im Empfänger

Die AGC regelt die ZF-Verstärkung in Abhängigkeit des Störsignals, das NF-Signal im Nutzkanal wird dadurch in der Lautstärke verändert. Möglicherweise wird auch bei Frequenzabständen <15 kHz das Störsignal frequenzverschoben mit hohem Ton demoduliert.

3.6.2 Intermodulation im Empfänger (IP_3 zu niedrig)

Zwei starke Stationen bei den Frequenzen f_1 und f_2 erzeugen „Phantomsignale“ bei den Frequenzen $2f_1$-f_2 und $2f_2$-f_1 (sonst nirgendwo). Bei SSB-Stationen ist es ein unverständliches, etwas verrauschtes/verbreitertes Signal, im CW-Kontest ein (viel besser beobachtbares) CW-Signal mit sinnlosem Rhythmus und seltenem Auftreten. Da immer beide Stationen senden müssen, haben diese Signale einer relativ geringere Auftrittsdauer und -wahscheinlichkeit.

3.6.3 Senderintermodulation

Das typische „Splatter“-Geräusch, also ein im Takt der Modulation veränderliches breitbandiges Signal, in Trägernähe eher impulsähnlich, trägerfern eher rauschähnlich.

3.6.4 Phasenrauschen im Sender oder Empfänger

Im Empfänger hört man ein mit der Modulation des störenden Senders veränderliches Rauschen, das mit größerem Trägerabstand abnimmt. Der Höreindruck ähnelt einem Aurora-Signal mit sehr starker Spreizung. Es ist ohne zusätzliche Messungen nicht unterscheidbar, ob der Sender oder der Empfänger dafür verantwortlich ist, ebenso ist der Audioeindruck der trägerfernen Senderintermodulation sehr ähnlich.

3.6.5 Breitbandrauschen des Senders

Im gesamten Band steigt das Rauschen an, sobald der Sender eingeschaltet ist, selbst wenn nicht moduliert wird. Der Rauschpegel ist entweder modulationsunabhängig oder - bei starker ALC-Aktion - in Sprech-/Tastpausen erhöht.

3.6.6 ALC-Probleme und Tastclicks

Inpulsförmige Störungen, die an den Tastflanken (CW) oder nach kurzen Sprechpausen (SSB) auftreten mit oft sehr großer Bandbreite und relativ großer Amplitude.

4 Messungen und Ergebnisse

Im Zeitraum zwischen Februar 2005 und Februar 2006 wurde in mehreren Meßkampagnen eine größere Anzahl von 2-m-Transceivern und Transverterkombinationen vergleichbar untersucht. Es handelt sich durchweg um anonyme Geräte aus dem Besitz einzelner Funkamateure, zum Teil mit Modifikationen, darauf wird hingewiesen soweit bekannt. Natürlich

ist nicht auszuschließen, daß im Einzelfall ein positiver oder negativer Meßausreißer vorliegt und die Ergebnisse nicht serientypisch sind.

Alle Rauschleistungen sind wenn möglich auf 2,5 kHz Bandbreite normiert. Das ist beim Vergleich mit Messungen aus anderen Quellen zu berücksichtigen - zwar ist im professionellen Umfeld der Bezug auf 1 Hz Bandbreite üblich, jedoch besteht bei solchen Angaben die Gefahr der Fehlinterpretation durch den mit der Nachrichtentheorie nicht so vertrauten Funkamateur.

4.1 Statische Messungen

Am Empfänger wurde gemessen :

- die Gesamtrauschzahl durch Ein-/Ausschalten einer kalibrierten Rauschquelle und jeweilige Messung der über 2 Sekunden gemittelten Spannung am NF-Ausgang.
- der Intercept-Point mit zwei entkoppelten Meßsendern, Beobachtung des Intermodulationsprodukts am S-Meter und Ersatz dieses Signals durch einen dritten Meßsender zur Kalibrierung; aus den Pegelwerten kann der IP_3 ermittelt werden.
- die Zweisignal-Empfängerdynamik: Zustopfen und reziprokes Mischen durch Empfang eines Nutzsignals mit 10 dB (S+N)/N und Zuführen eines ausreichend rauscharmen Störsignals, bis das S/N um 3 dB abgenommen hat; diese Signalleistung wird auf den Rauschflur in 2,5 kHz Bandbreite bezogen. Die Messung erfolgt bei Trägerabständen von 20, 50 und 200 kHz.

Aus Rauschzahl und Intercept-Point kann die Dreisignal-Empfängerdynamik berechnet werden.

Der Sender wurde in CW-Stellung mit Dauerträger betrieben und das erzeugte Spektrum beobachtet; das verwendete Meßverfahren mit Direktumsetzung erlaubt es nicht, die Anteile beider Seitenbänder zu unterscheiden. So erhält man:

- Senderrauschen bei unmoduliertem Träger in 20, 50 und 200 kHz Abstand.

Dieser Wert erlaubt den direkten Vergleich mit der Unterdrückung des reziproken Mischens beim Empfänger. Für beide Seitenbandrauschmessungen im Sender und Empfänger wird ein rauscharmer Oberton-Quarzoszillator als Signalquelle verwendet.

Meßfehler können entstehen, wenn die AGC nicht oder nicht vollständig abschaltbar ist; dann wird insbesondere die Rauschzahl zu hoch ermittelt. Das Gleiche passiert bei starkem Rauschen oder Schwingen des NF-Verstärkers selbst. Für die Ermittlung der Pegel von Intermodulationssignalen wurde das S-Meter benutzt, was gut funktioniert, wenn es ein echtes Analoginstrument ist, hingegen schlechter bei groben Balkenanzeigen.

Die Zweisignal-Empfängerdynamik wird fast immer durch Phasenrauschen und nur selten durch Zustopfen (Blocking) bestimmt. Der ermitteltete Wert ist einigermaßen vergleichbar mit dem „Blocking Dynamic Range“ (BDR) nach ARRL-Definition, wenn man vom ARRL-BDR 28 dB abzieht (-34dB zur Bandbreitekonversion 1 Hz / 2,5 kHz und +6 dB zur Umrechnung von 1 dB = 25% Rauschanstieg nach 3 dB = 100% Rauschanstieg).

Tabelle 1 zeigt die Meßergebnisse für die 144-MHz-Transceiver im Überblick. Die Geräte aus aktueller Produktion oder der jüngeren Vergangenheit erzeugen durchweg ein untragbar starkes Rauschen im Sender - in der eingangs dargestellten Situation am Standort des Autors

Gerätetyp	NF	IP_3	IM-frei	RX-Blocking [dB]			TX-Rauschen [dB]		
	[dB]	[dBm]	[dB]	20 kHz	50 kHz	200 kHz	20 kHz	50 kHz	200 kHz
IC275E	5,6	-7,5	85	98	110	117	-97	-104	-109
IC7000	5,6	-7,5	85	91	94	102	-87	-93	-93
IC746	3,6	-7,5	86	87	95	109	-82	-91	-105
IC821H	3,4	-9	85	80	90	101	-77	-88	-97
IC910H	3,7	-8,5	85	81	89	100	-78	-88	-98
IC202	7,7	-14	79	100	104	107	-100	-102	-102
„Hohentwiel“	11,4 (?)	-5,5	82	96	97	100	-96	-97	-101
FT225RD + Mods	6,1	+7	94	90	90	110	-85	-92	-106
FT817	5,4	-12	82	87	96	106	-83	-91	-96
FT857D	6,1	-2	88	86	96	106	-84	-93	-99
TS700G +Mods	4,9	-13	81	100	108	111	-102	-106	-107
TS700S VV aus	6,6	-7	84	100	107	111	-96	-102	-104
TS790E	4,5	-14,5	81	103	104	109	-84	-94	-95

Tabelle 1 Übersicht der Meßergebnisse an 144-MHz-Transceivern; Modifikationen der getesteten Geräte sind im Text beschrieben; die bezüglich Phasen- und additivem Senderrauschen besten Geräte sind markiert.

würde der Rauschpegel der drei stärksten Stationen im gesamten Schmalbandsegment wenigstens 10...20 dB betragen, so daß kein vernünftiger Betrieb möglich wäre. Glücklicherweise benutzen zwei der drei Stationen bessere Geräte.

„Hohentwiel“ und mit Einschränkungen IC202 umd TS700G zeigen, daß das Rauschen des Senders nicht größer sein muß als das durch den LO dominierte Phasenrauschen des Empfängers.

Der getestete FT225RD war stark modifiziert, u. a. mit einem neuen Frontend, und kann daher nicht als serientypisch gelten. Der TS700G hat einen anderen Transistor im Eingangsverstärker und beim „Hohentwiel“ wurden einige Veränderungen vorgenommen, außerdem war die Rauschzahlmessung etwas problematisch und im Ergebnis unsicher.

Zusätzliche Probleme z. B. diskrete Nebenwellen durch geschaltete Stromversorgungen, Displaysignale u. ä. werden in der Tabelle nicht genannt, können die Situation aber in der Realität schlechter machen; ebenso transiente Effekte im Sender, die im nächsten Abschnitt behandelt werden.

Tabelle 2 zeigt die untersuchten Kombinationen aus KW-Transceiver und Transverter bei 28 MHz Zwischenfrequenz. Das Niveau ist nicht viel besser als das der Stand-alone-Transceiver, wobei die Ausreißer nach unten nicht ganz so schlimm ausfallen.

Beim Elecraft K2 und beim TS850 waren jeweils der geräteinterne Vorverstärker eingeschaltet, da die Rauschzahl sonst noch schlechter ausgefallen wäre. Das hat deutliche Konsequenzen auf die verbleibende Dreisignaldynamik (den intermodulationsfreien Dynamikbereich). Bei der anderen Kombinationen war der geräteinterne Vorverstärker des KW-Transceivers jeweils ausgeschaltet.

Aus Zeitgründen wurden nicht alle Kombinationen und nicht alle Messungen getestet.

Gerätetyp	NF	IP_3	IM-frei	RX-Blocking [dB]			TX-Rauschen [dB]		
	[dB]	[dBm]	[dB]	20 kHz	50 kHz	200 kHz	20 kHz	50 kHz	200 kHz
Elecraft K2/XV144	6	-26,5	72	95	100	101	-93	-92	-93
TS850 + LT2S	3,7	-26,5	73	100	102	104	-93	-100	-103
TS870 + LT2S	4,9	-6	86	98	104	112	-95	-100	-104
IC735 + LT2S				101	106	113			
FT1000MP + LT2S				97	104	113			
FT1000MPMarkV + TR144H	1,7	-12,5	84	97	106	118	-91	-99	-101

Tabelle 2 Übersicht der Meßergebnisse an Transceiver-/Transverterkombinationen mit 28 MHz ZF.

Gerätetyp	NF	IP_3	IM-frei	RX-Blocking [dB]			TX-Rauschen [dB]		
	[dB]	[dBm]	[dB]	20 kHz	50 kHz	200 kHz	20 kHz	50 kHz	200 kHz
Orion + Javornik		0					-93	-88	-99
TS870 + Javornik	1,9	-1,5		95	103	112	-92	-97	-99
IC735 + Javornik		-3,5		106	115	117			
FT1000MP + Javornik	1,4	+1	93	100	115	118	-98	-106	-110
Elecraft K2 + TR144H40	1,0	-9	87	96	103	114	-90	-95	-96
IC746 + TR144H40	1,2	-5,5	89	99	106	119			
FT1000MPMarkV + TR144H40	1,3	-3	90	104	113	120			
FT1000MPMarkV + TR144H	1,6	-7,5	87	97	106	118	-91	-99	-101

Tabelle 3 Übersicht der Meßergebnisse an Transceiver-/Transverterkombinationen mit 14 MHz ZF.

Schließlich bleiben noch die Messungen mit einer Zwischenfrequenz von 14 MHz. Hier finden sich die „am wenigsten schlechten“ Gerätekombinationen, Ausreißer finden sich keine wegen der besser Abstimmung zwischen Transceiver und Transverter z. B. in der Empfangsverstärkung. In allen Fällen war der geräteinterne Vorverstärker ausgeschaltet.

Die markierte Kombination FT1000MP+Javornik, die über alles die besten Eigenschaften hat, profitiert davon, daß der Javornik-Transverter [6] in Verstärkung, IP_3, Sendepegel u. a. speziell auf diesen Transceiver abgestimmt wurde. Allerdings fehlt auch dieser Kombination noch ein gutes Stück (mehr als 10 dB) zum „störungsarmen“ Kontestbetrieb, und wie der nächste Abschnitt zeigen wird, gibt es leider weitere, aus den Meßwerten der Tabelle nicht erkennbare Probleme.

4.2 Dynamische Messungen

Da das Seitenbandrauschen auch der besten Spektrumanalysator viel zu schlecht ist, um direkt Ausgangsspektren relevant darstellen zu können, wurde ein spezieller Meßaufbau erstellt (siehe „Anhang B: Meßhilfsmittel“). Dazu wird das zu untersuchende Sendesignal auf eine niedrige Zwischenfrequenz bei 415 kHz mit Hilfe des rauscharmen Quarzoszillators

umgesetzt und dort einem Notchfilter zugeführt, das den Träger und die in dessen Nähe liegenden starken Signalanteile um min. 30 dB unterdrückt. Dadurch wird der Spektrumanalysator in diesem Umfang entlastet und es können das Seitenbandrauschen des Senders sowie Senderintermodulation und Transienten dargestellt werden.

Die dargestellten Spektren umfassen eine gesamte Bandbreite von 200 kHz, wobei in der Mitte etwa 25 kHz abgeschnitten sind. Die Signalleistung wird stets so justiert, daß sie (ohne Notch) 20 dB oberhalb der Referenzline liegt. Bei allen Messungen liegt das Senderrauschen über dem Eigenrauschen des Spektrumanalysators.

Um möglichst viele Transienten zu erfassen wird der Analysator im „MAX HOLD“-Modus betrieben. Dadurch und durch die fehlende Spiegelselektion wird das Senderrauschen stärker dargestellt; relative Aussagen sind aber dennoch möglich. In den folgenden Bildern sind immer das Spektrum mit CW-Dauerträger und das Spektrum bei normaler SSB-Modulation übereinandergeschrieben..

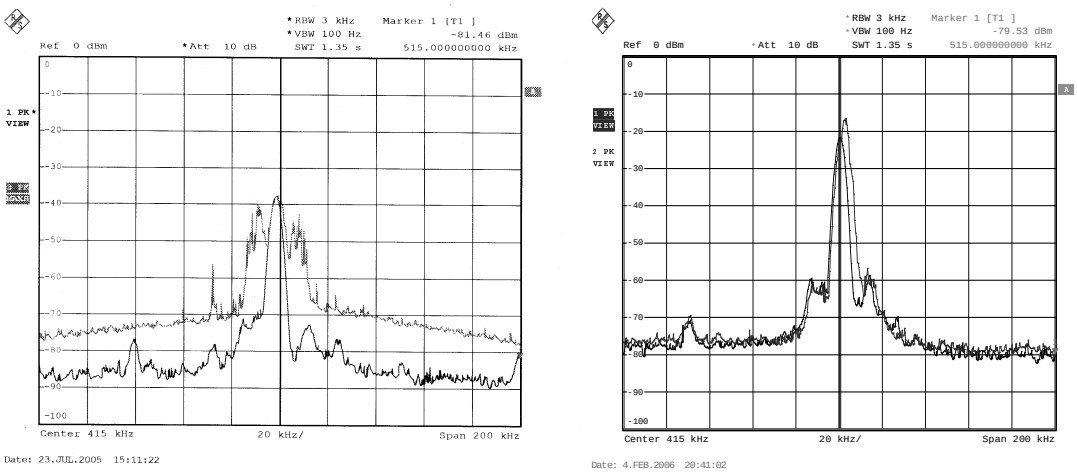


Bild 5 Spektrum FT1000MP mit Javornik (links) und FT1000MPMarkV mit TR144H (rechts)

Bild 5 zeigt im Vergleich den FT1000MP (ALC in Funktion) und den FT1000MPMarkV (ALC abgeschaltet). Es ist zu erkennen, daß der an sich fast 10 dB bessere Senderrauschabstand der linken Kombination durch die ALC in den Sprechpausen zunichte gemacht wird. Um das besonders deutlich darzustellen, wurde im linken Bild in SSB ausnahmsweise nicht moduliert.

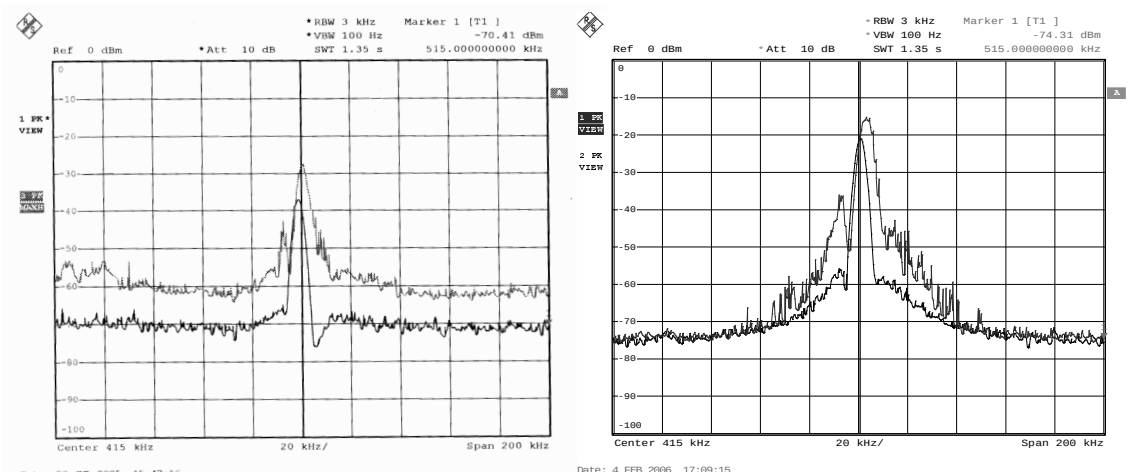


Bild 6 Spektrum IC746H mit 4W auf TR144H (links) und FT857D (rechts)

Bild 6 zeigt links das erzeugte Senderspektrum eines auf 4 W Sendeleistung reduzierten IC746, das bei 14 MHz einen TR144H40 speist. Durch die geringe Sendeleistung regelt die ALC bei SSB in den Sprechpausen die Verstärkung so hoch, daß eine wahrer Rauschgenerator entsteht. Zum Vergleich rechts ein FT857D, der ein typischer Vertreter der meisten moderneren Transceiver mit unnötig hohem Senderrauschen ist.

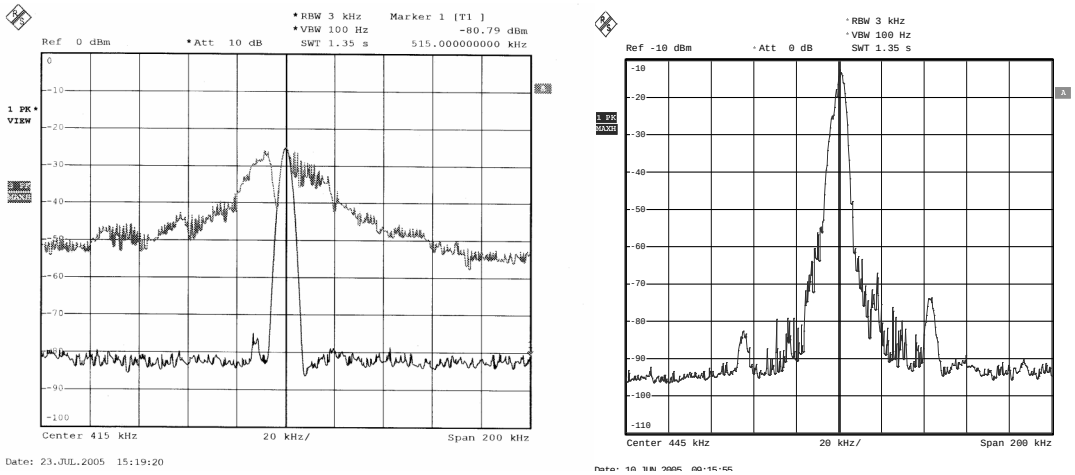


Bild 7 Spektrum IC202 (links) und IC275E (rechts)

In Bild 7 ist links ein IC202 dargestellt, dessen SSB-Spektrum fürchterlich aussieht - ob es am fehlenden Ruhestrom einer Stufe liegt, konnte nicht geklärt werden. Aber der Eigentümer ist damit als Nachsetzer für den GHz-Bereich QRV... - rechts das Spektrum eines IC275E, dessen ALC-Aktion durch einen Neuabgleich reduziert war. Erkennbar sind aber diskrete Nebenwellen bei +-41 kHz vom internen Schaltnetzteil, mit externer 12-V-Versorgung war dies das rauschärmste Spektrum im SSB-Betrieb

Bild 8 zeigt noch einmal deutlich die negative Wirkung des ALC-Einschwingens am Beispiel des FT817. Mit einem „Aaaa“ moduliert regelt die ALC nicht, bei normaler Sprache führt die Regelwirkung zu erheblichen transienten Störungen.

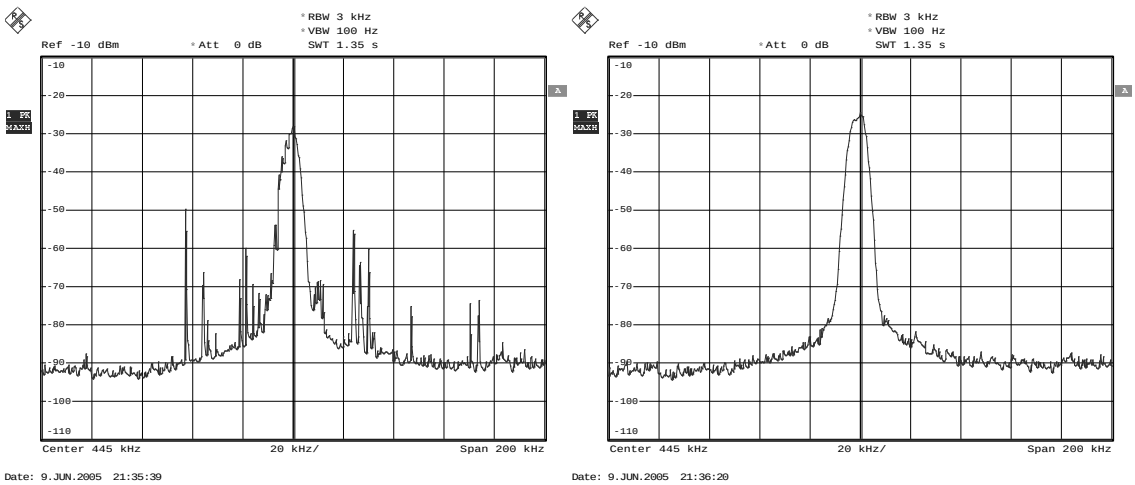


Bild 8 Spektrum FT817 mit normaler Sprachmodulation (links) und beim Besprechen mit einem langgezogenen „Aaaaa“ (rechts)

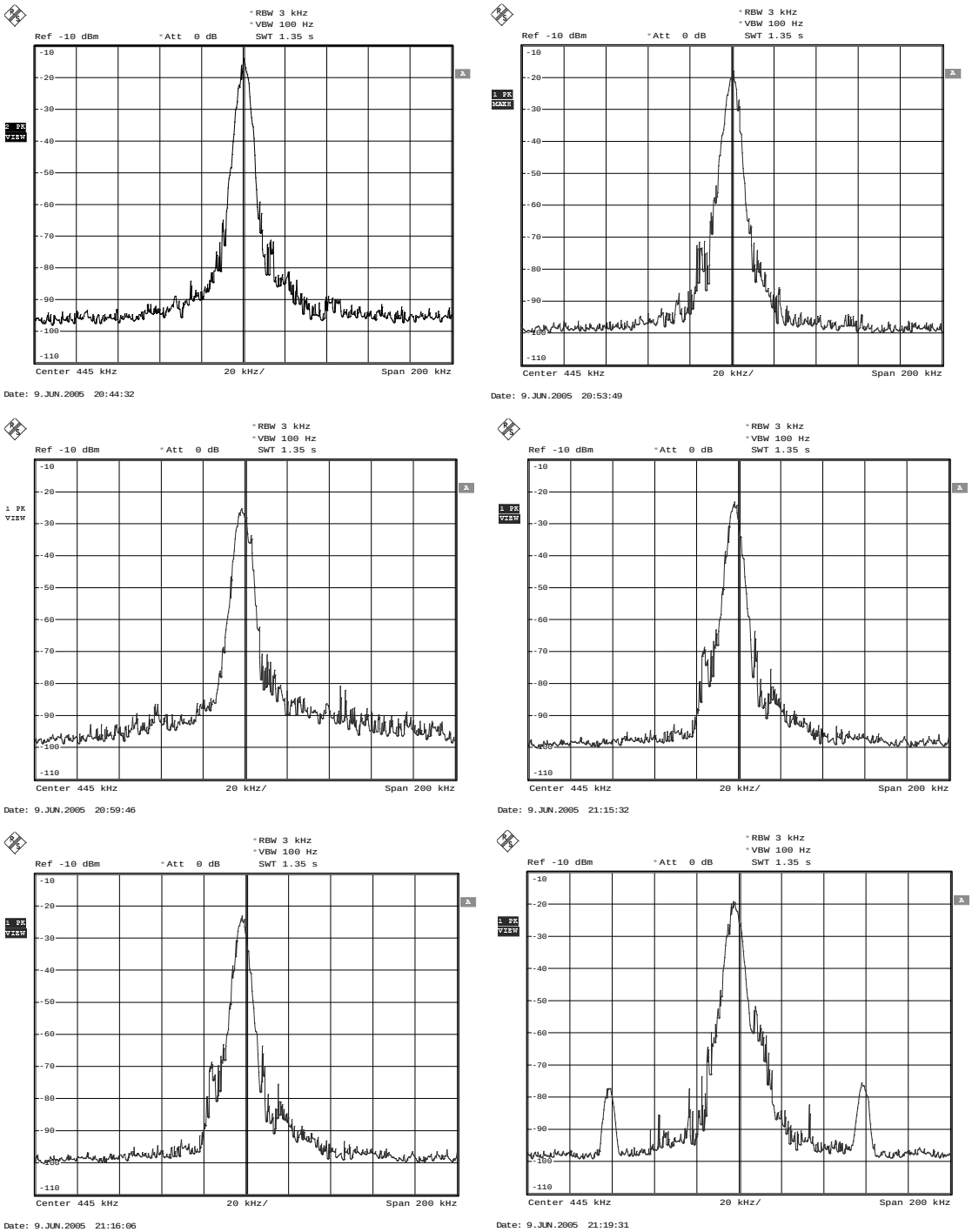


Bild 9 Spektren Eigenbau-TRX DK2DB mit verschiedenen nachgeschalteten PAs:
oben links: TRX alleine
oben rechts: MRF151G 250W
Mitte links: 4CX350A 350W
Mitte rechts: QQU06/40 100W
unten links: 2 x RA60H1317M 120W aus Linearnetzteil
unten rechts: 2 x RA60H1317M 120W aus Schaltnetzteil EA3022

Bild 9.zeigt verschiedene PAs hinter einem guten Steuersender (DK2DB Eigenbau). Keine der PAs - 12-V-LDMOS, 50-V-TMOS, und zwei Röhren - produziert so starke Intermodulationsverzerrungen, daß diese das Senderrauschen in 50kHz dominieren würden - lediglich

das Schaltnetzteil erzeugt diskrete Nebenwellen bei einem Frequenzabstand entsprechend seiner Schaltfrequenz.

Geringe Unterschiede im Senderrauschen zwischen den verschiedenen Bildern sind vermutlich auf unterschiedliche Steuerleistungen zurückzuführen.

5 Verbesserungsmöglichkeiten

5.1 Auswahl und Kombination geeigneter Komponenten

5.1.1 Transverterbetrieb

Konzeptionell ist eine Station aus üblichem Kurzwellentransceiver und Transverter dem optimierten Einbandtransceiver nicht unbedingt vorzuziehen, die Messungen zeigen aber, daß die besseren Stationen so aufgebaut sind. Wichtig ist dabei insbesondere, daß verschiedene KW-Transceiver bei unterschiedlichen Bändern ihre besten Eigenschaften haben - der TS870 ist bei 28 MHz besser als bei 14 MHz, der FT1000 ungekehrt. Insgesamt scheint eine ZF von 14 MHz besser abzuschneiden und sollte deshalb bevorzugt verwendet werden.

Der gesamte Pegelplan in Sender und Empfänger muß bei einer derartigen Kombination sinnvoll gewählt werden. Der Empfangskonverter einschließlich Mastvorverstärker sollte etwa 10 dB mehr Verstärkung erreichen als die Rauschzahl des KW-Nachsetzers bei abgeschaltetem internen Vorverstärker - das sind typischerweise 25...30 dB. Der Sendeumsetzer sollte mit maximaler verfügbarer Transverterausgangsleistung des KW-Senders angesteuert und dessen Verstärkung intern hinter dem Mischer und der ersten 144-MHz-Verstärkerstufe angepaßt werden - jedenfalls bei den üblichen Transverterausgangsleistung <-10 dBm.

Der Problematik transienter Störungen gebührt besondere Aufmerksamkeit, und die Situation ist leider unübersichtlich. Z. B. ist bei einem FT1000MP die ALC bei Transverterbetrieb eingeschaltet, bei einem FT1000MPMarkV in Menükonfiguration „PA off“ nicht. Diesen Menüpunkt gab es bei dem untersuchten FT1000MP aber nicht - möglicherweise ist das Verhalten auch noch firmwareabhängig. Angesichts der erheblichen Beeinträchtigungen durch solche Störungen gibt so ein intransparentes Verhalten für die Hersteller ein sehr schlechtes Bild ab. Auch Geräte wie das IC7800 sind davon betroffen [1]. Bei einem IC275E z. B. läßt sich die Sendeverstärkung an einem Poti manuell reduzieren und damit die ALC (bei nicht reduzierter Sendeleistung) weitgehend deaktivieren, allerdings um den Preis, daß die ALC dann Temperatur- und Frequenzabhängigkeit nicht mehr kompensieren kann.

5.1.2 Zusätzliche Filter

Da die meisten verwendeten Transverter deutlich besser als die KW-Nachsetzer sind, kann es sinnvoll sein, ein zusätzliches Filter bei 14 MHz einzuschleifen. Es wurden probeweise zwei Versionen realisiert (siehe „Anhang A: Zusatzfilter bei der ZF von 14 MHz“).

Ein Quarzfilter eignet sich insbesondere für die Kontestsstation mit „Hausfrequenz“ - es sollte aber in der Bandbreite so bemessen sein, daß der Bandbelegung angepaßt ein wenig nach unten und oben ausgewichen werden kann. Ein Versuchsaufbau mit zwei Quarzen und einer -1-dB-Bandbreite von 11 kHz wurde realisiert. Leider stören die immer oberhalb der Serienresonanzfrequenz liegenden Nebenresonanzen bei der großen Bandbreite so stark, daß

die Nutzbarkeit etwas eingeschränkt ist. Ein zweiter Entwurf mit 4 Quarzen und geringerer Bandbreite wurde noch nicht umgesetzt.

Außerdem wurde versucht, ein abstimmbares Bandpaßfilter aufzubauen und durch eine „Q-Multiplier“-Schaltung die Bandbreite weiter zu reduzieren. Das Ergebnis ist durchaus vielversprechend, allerdings sollte der lineare Aussteuerbereich des aktiven Schaltungsteils noch etwas erweitert werden. Selbst ohne Q-Multiplier kann ein passives Bandpaßfilter bei 14 MHz in großem Frequenzabstand von mehr als 100 kHz eine gewisse Entlastung bieten.

Zusätzliche Filter sollten einerseits abschaltbar sein, andererseits aber auch im Sendebetrieb eingeschleift werden!

Es ist zu beachten, daß beide Filtertypen bei 28 MHz schwieriger realisierbar sind.

5.2 Erhebliche Modifikationen und Eigenbau

Durch Modifikationen in Fertiggeräten kann man versuchen, die erkannten Schwachpunkte zu beseitigen. Insbesondere sollte eine schlecht funktionierende ALC deaktiviert werden. Eine Änderung des Pegelplans im Sender zu höheren Pegel am Quarzfilter wird meist schon schwieriger zu erreichen sein. Der Austausch des Empfängereingangsteils ist in der Vergangenheit ebenfalls gelegentlich praktiziert worden und kann bezüglich der Dreisignaldynamik (und auch in anderen, hier nicht untersuchten Punkten wie dem AGC-Einsatz) deutliche Verbesserungen bringen.

Schließlich bleibt die aufwendige und nur selten umsetzbare Möglichkeit des kompletten Eigenbaus. Dann kann auch versucht werden, durch möglichst gute Oszillatoren die Rauschseitenbänder des Senders wie des Empfängers zu minimieren und dadurch die Zweisignaldynamik auf das gewünschte Maß zu verbessern. Für geringes Phasenrauschen sollten der Oszillatorschwingkreis möglichst schmalbandig und die Oszillatorleistung hoch sein.

Abstimmbare LC-Oszillatoren nahe der Endfrequenz erreichen selbst bei sehr hochwertigem Aufbau [7][8] bei akzeptablen Abmessungen nur Schwingkreisbandbreiten von etwa 500 kHz, dann ist geringes Phasenrauschen nur durch eine hohe Oszillatorleistung möglich, die wiederum die Abstimmung durch Kapazitätsdioden (in einer PLL) wegen der hohen Schwingkreisspannungen erschwert.

Mit einem Premixoszillator (z. B. [9]) läßt sich für den abstimmbaren VCO bei einer wesentlich niedrigeren Frequenz eine schmalere Bandbreite erreichen, aber um den Preis von zusätzlichem additivem Breitbandrauschen in der Mischschaltung, die wegen der sonst entstehenden Nebenwellen durch Harmonischenmischung nur bei niedrigen Pegeln betrieben werden darf. Die Meßergebnisse des TS700 zeigen dieses Verhalten mit guten Werten in Trägernähe, die sich aber in größerem Frequenzabstand kaum verbessern.

Oszillatoren mit gezogenen Grundwellenquarzen und anschließender Frequenzvervielfachung verhalten sich ähnlich, die Bandbreite des Oszillatorschwingkreises ist sehr klein, durch die Frequenzvervielfachung erhöht sich aber das breitbandige Rauschen. IC202 und Hohentwiel verwenden dieses Konzept, es könnte aber mit höherer Grundquarzfrequenz und höherer Oszillatorleistung noch deutlich verbessert werden. Wieder wird dann die Varicap-Abstimmung schwierig wegen der hohen Schwingkreisspannungen.

Insofern erscheint dem Autor derzeit der Doppelüberlagerungs-Sende-Empfänger mit variabler 1. ZF - ganz vergleichbar einem Transverterkonzept - auch für den reinen 144-MHz-

Transceiver vorteilhaft. Hier läßt sich ein mit hoher Leistung betriebener relativ niederfrequenter Oszillator mit einem Schwingkreis mittlerer Güte und dennoch kleiner Bandbreite mit mehreren umschaltbaren Obertonquarzoszillatoren kombinieren, ohne daß irgendwo unnötiges Breitbandrauschen dazukommt. Der Nachteil eines solchen Konzepts, die späte Selektion und damit der geringere IP_3 bzw. die erhöhten Anforderungen an die Linearität der in der ersten und zweiten ZF eingesetzten Komponenten ist weniger störend als eine zu geringe Zweisignaldynamik.

Wer den kompletten Eigenbau scheut, kann in ähnlicher Weise auch einen Transverter mit abstimmbarer Umsetzfrequenz mit einem KW-Transceiver bei einer Festfrequenz von z. B. 10,7 MHz und zwischengeschaltetem Quarzfilter kombinieren. Die Bedienung einer solchen Station wäre allerdings gewöhnungsbedürftig.

6 Zusammenfassung

Die Beschäftigung mit der QRM-Problematik und die durchgeführten Messungen haben dem Autor und den anderen Beteiligten eine ganze Reihe neuer Erkenntnisse geliefert, von denen einige hier noch einmal aufgezählt werden sollen:

- Die größeren Probleme liegen beim Sender. Das ist insoweit nachvollziehbar, als dazu bisher weit weniger Messungen in Gerätetests durchgeführt wurden ([1] bildet eine Ausnahme) und dadurch kaum Druck auf die Hersteller ausgeübt wird. Aber auch bei Diskussionen mit Betroffenen fällt auf, daß das Interesse am Verhalten des Empfängers größer ist als an dem des Senders.
  Um meine eigene QRM-Situation zu verbessern, muß ich aber erst einmal den Sender meines Nachbarn optimieren!
- Bezüglich Sender-Breitbandrauschen sind alte Geräte oft besser als moderne. Eine bewußte Reduktion der Sendeleistung verschlechtert die Qualität des Sendesignals fast immer und sollte nicht vorgenommen werden.
- Statische Messungen am Sender genügen nicht angesichts der eklatanten Entwicklungssünden im Bereich ALC, Leistungsregelung und Tastung.
- Der Teufel steckt im Detail. Um die eigene oder eine fremde Station optimieren zu können, braucht es eine Menge Erfahrung und/oder geeignete Meßtechnik. Auch weniger offensichtliche Komponenten wie z. B. die Stromversorgung müssen in die Untersuchung einbezogen werden.
- „Alles Murks!“ - alle untersuchten Transceiver waren von dem, was billigerweise zu fordern und mit ausreichender Sorgfalt auch zu erreichen wäre, ein gutes Stück entfernt.

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, daß der Empfänger-Interceptpunkt bei 2-m-Transceivern nur ein weniger wichtiges Kriterium unter mehreren für die Großsignalverträglichkeit ist.

Der Autor dankt allen Beteiligten, u. a. den Kontestern von DF0OL, DJ0QZ, DK0BN und DK0OX/DR9A, die teilweise weite Anfahrten in Kauf genommen und große Mengen Material transportiert haben, um die Vergleichsmessungen zu ermöglichen.

7 Referenzen

[1] Asbrink, Leif, SM5BSZ: Real life dynamic range of modern amateur transceivers. DUBUS 2/2005, 22-37.

[2] Asbrink, Leif, SM5BSZ: Der Dynamikbereich von 2-m-Geräten. UKW-Berichte 4/81, 228-235

[3] *http://www.sm5bsz.com/*

[4] Testberichte von Günter Schwarzbeck DL1BU in cq-DL ca. 1975-1985, z. B. 3-Watt-Kleintransceiver für SSB und CW von ICOM IC202S für 144 MHz, IC402 für 432 MHz. cq-DL 3/79, 102-107, und cq-DL 4/79, 159-163.

[5] McKenzie, Angus, G3OSS: The Buyer's Guide to Amateur Radio. RSGB: Herts 1986.

[6] *http://lea.hamradio.si/%7Es53ww/xvrt/xvrt.htm*

[7] Martin, Michael, DJ7VY, Plötz, Manfred, DL7YC: VHF Receiver with outstanding Performance. DUBUS Technik 1, 128-142.

[8] Martin, Michael, DJ7VY: Rauscharmer UKW-Oszillator mit Diodenabstimmung, digitaler Frequenzrastung und Frequenzanzeige. UKW-Berichte 4/80, 194-209.

[9] Neie, Claus, DL7QY: SSCW 702 SSB/CW 2m & 70cm Duoband Transceiver, Teil1 (VFO). DUBUS 2/85, 108-136.

8 Anhang A: Zusatzfilter bei der ZF von 14 MHz

8.1 Quarzfilter für 14 MHz

Bild 10 zeigt den Aufbau und die simulierte Übertragungsfunktion eines zweipoligenQuarzfilters, Bild 11 die Meßergebnisse.

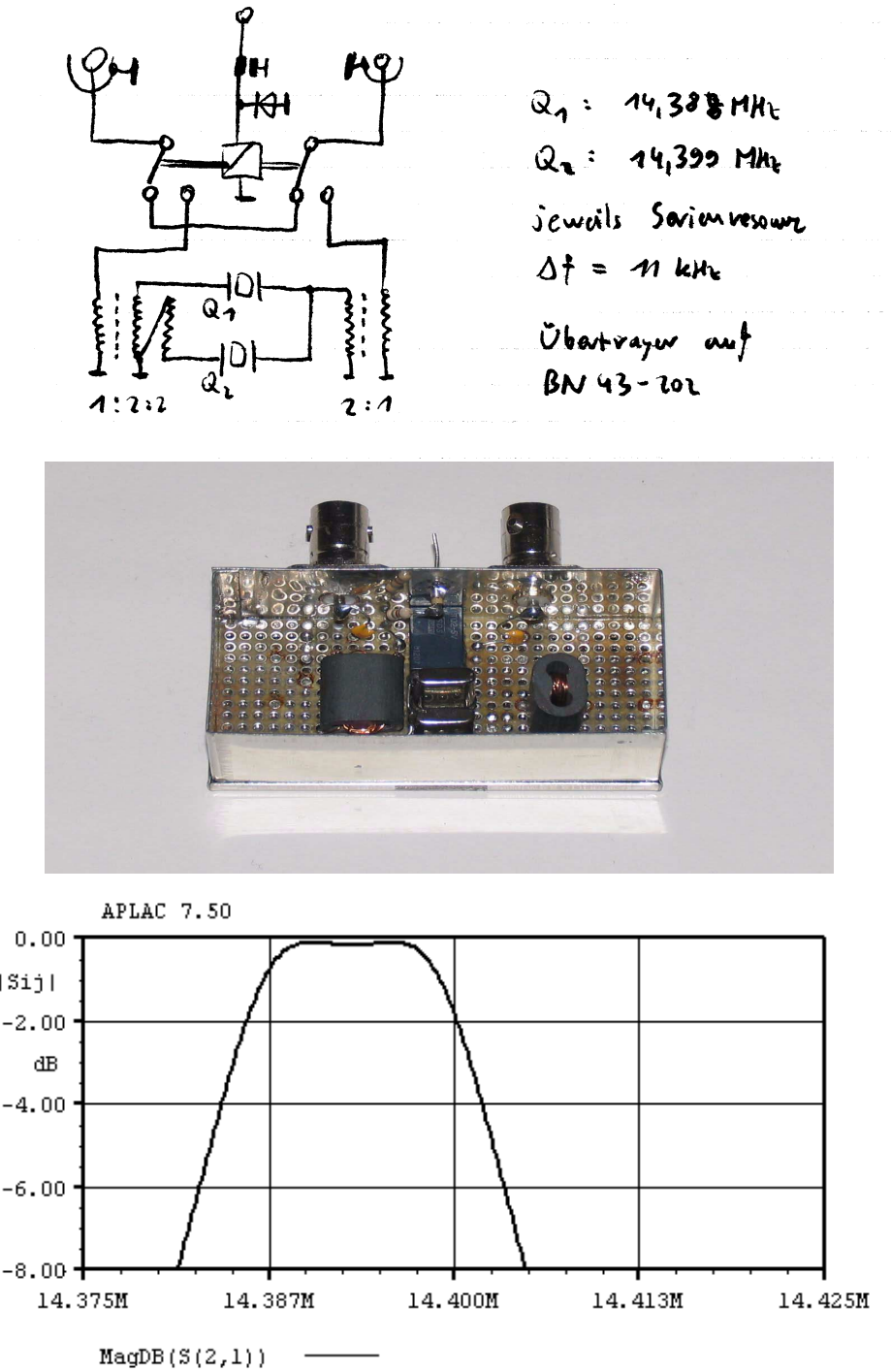


Bild 10 Zweipoliges Quarzfilter für 14,393 MHz (USB) für DR9A.
Schaltung, Versuchsaufbau und simulierte Übertragunsgfunktion.

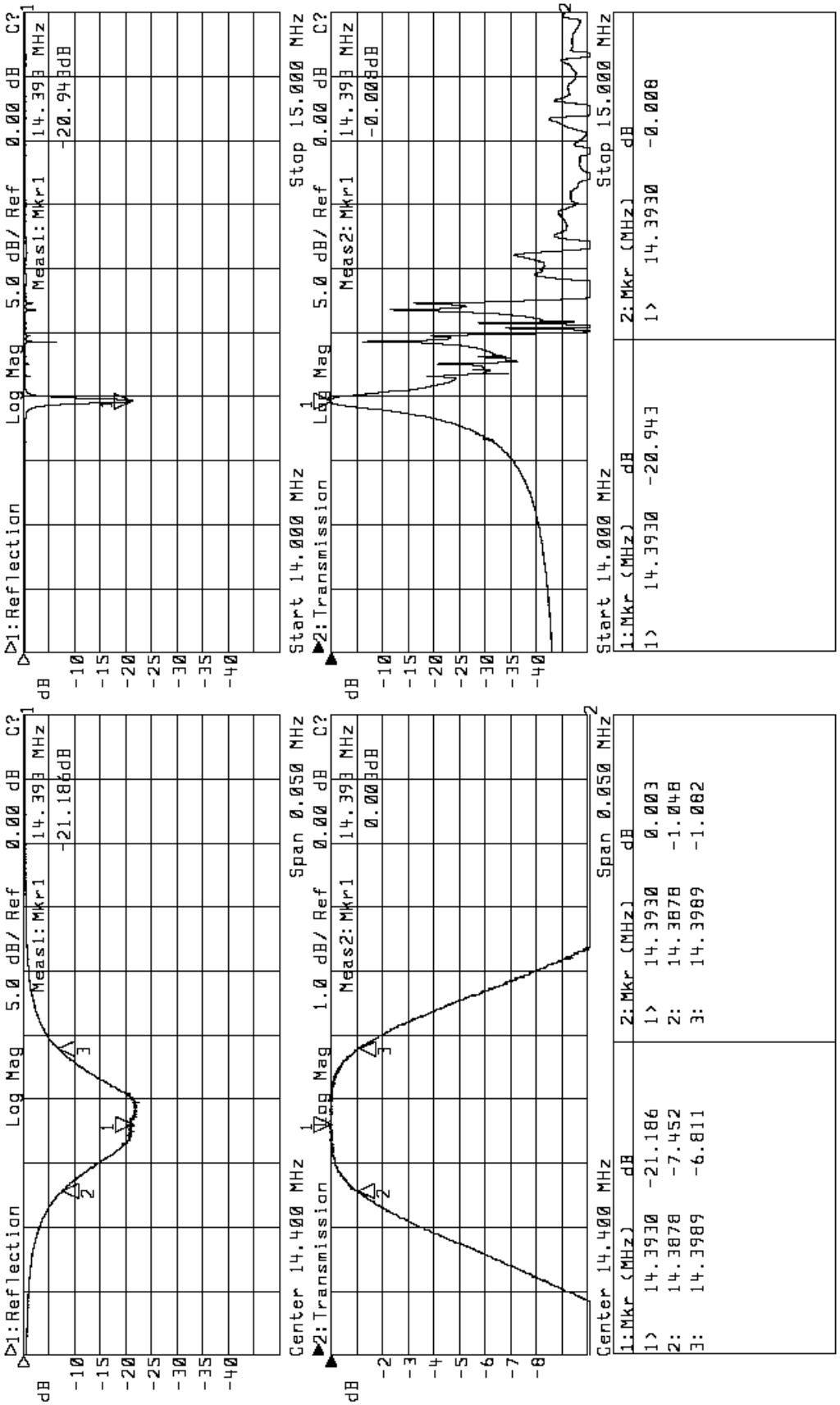


Bild 11 Zweipoliges Quarzfilter für 14,393 MHz (USB) für DR9A.
Meßergebnis mit Nebenresonanzen.

8.2 Abstimmbarer Pre-/Postselector für 14 MHz mit Q-Multiplier

Die Leerlaufgüte von LC-Schwingkreisen für 14 MHz liegt mit sorgfältig ausgewählten Ringkernspulen bei über 300; nach Unterlagen von Amidon ist der Kern T68-6 mit etwa 20 Windungen güteoptimal. Diese Leerlaufgüte konnte auch an einem Versuchsaufbau verifiziert werden.

Plant man damit ein zweikreisiges Bandfilter mit 6 dB Einfügungsdämpfung, so bleibt eine belastete Güte von etwa 150 für jeden der beiden Schwingkreise und eine -20-dB-Bandbreite des Bandfilters von ca. 300 kHz. Diese Abschätzung ist zwar sehr grob, zeigt jedoch, daß ein solches Filter schon hilfreich sein kann, weitere Verbesserungen aber wünschenswert sind.

Daher wurde versucht, die Schwingkreise durch eine „Q-Multipilier“-Schaltung zu entdämpfen. Mit 8 parallelgeschalteten rückgekoppelten J310 je Schwingkreis gelingt eine fast vollständige Entdämpfung, einstellbar durch das jeweils parallelgeschaltete Dämpfungspoti. Über einen Doppeldrehkondensator ist dieses Filter leicht über 500 kHz in der Mittenfrequenz abstimmbar, bei einer -20-dB-Bandbreite von etwa 100 kHz.

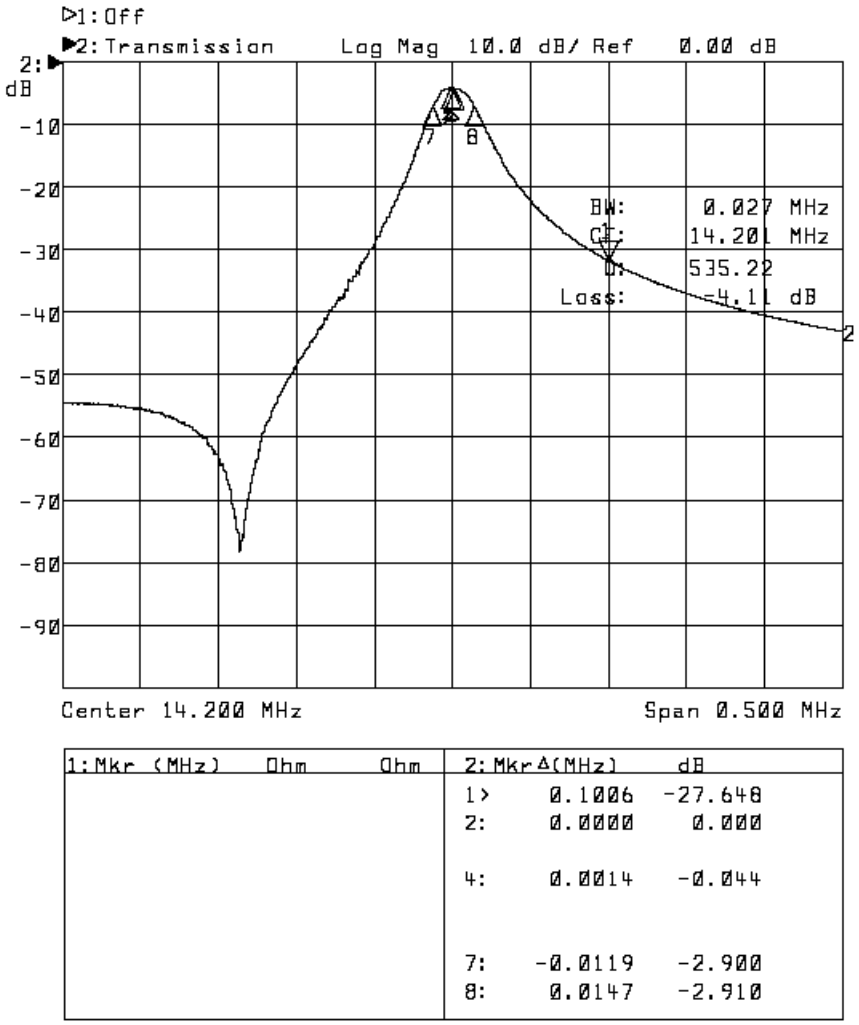
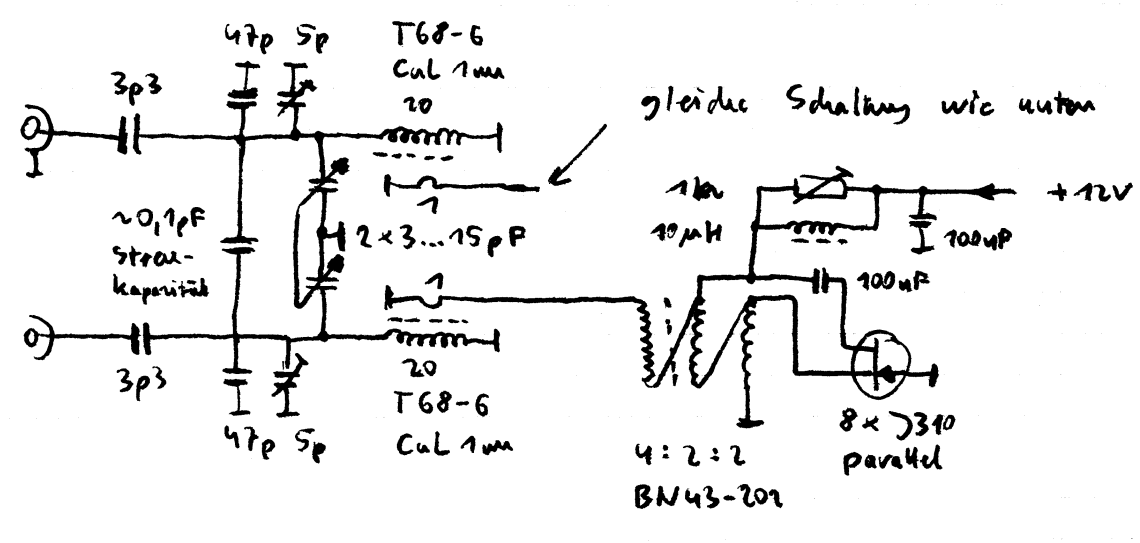


Bild 12 Übertragungsfunktion des zweikreisigen Bandpaßfilters mit Q-Multiplier

Allerdings bringt die aktive Schaltung des Q-Multipliers auch Nachteile; das Eigenrauschen ist an der vorgesehenen Einsatzstelle nicht störend, wohl aber die dadurch erzeugten nichtlinearen Verzerrungen. Die -1-dB-Sättigungsleistung liegt bei ca. +10 dBm, der IP_3 allerdings bei kleinen Trägerabständen von 1 kHz bei nur etwa +16 dBm, um bei großen Trägerabständen von mehr als 50 KHz auf mindestens +25 dBm anzusteigen.



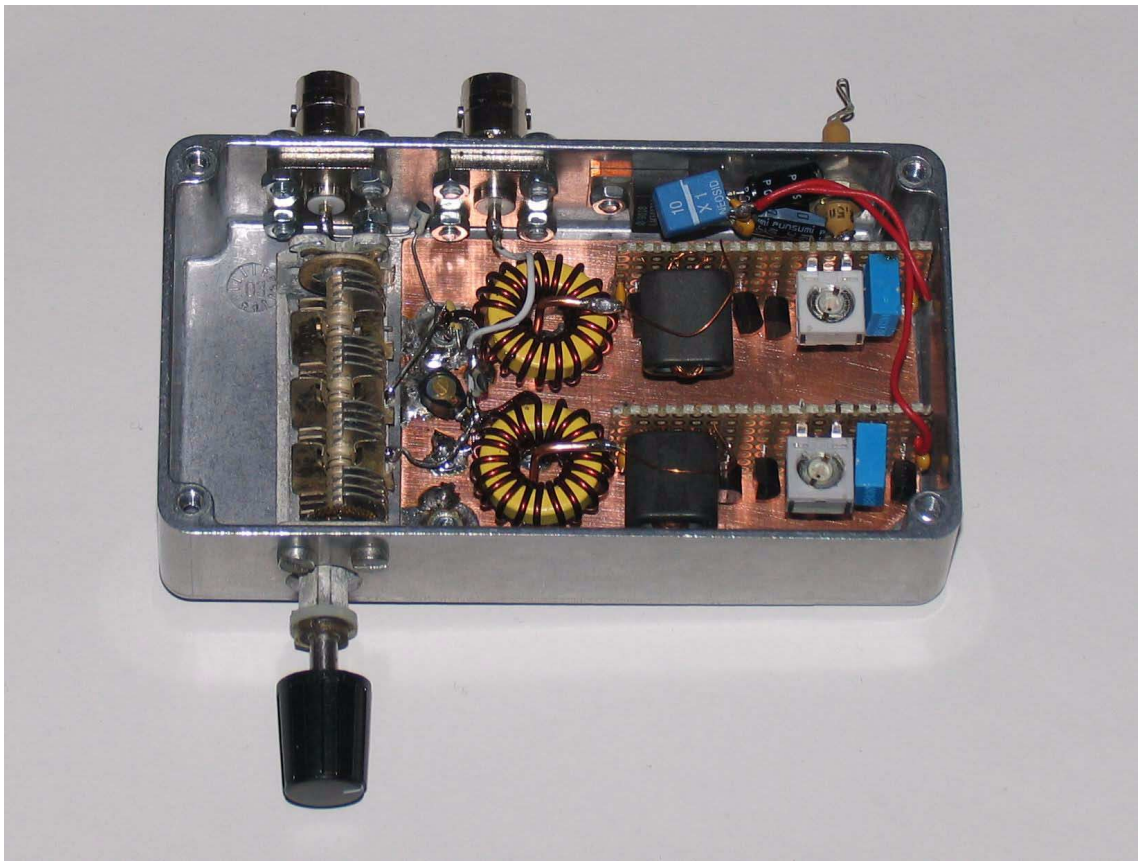


Bild 13 Schaltbild und Photo des abstimmbaren Bandfilters

9 Anhang B: Meßhilfsmittel

9.1 Verwendete Meßgeräte

Als rauscharmer Empfängermeßsender für die blockierenden Signale wird ein HP8642B eingesetzt, der - gemessen gegen den im nächsten Abschnitt beschriebenen Quarzoszillator - in 20/50/200 kHz Abstand -114/-116/-116 dBc Rauschen in 2,5 kHz Bandbreite (-148/-150/-150 dBc/Hz) erreicht, das ist etwas besser als spezifiziert. In besonders kritsichen Fällen wurde statt dessen der Quarzoszillator verwendet.

Der Spektrumanalysator ist ein Rohde&Schwarz FSP30 und hat als Mittelklasse-Analaysator einen Pegel des Seitenbandrauschens von typisch -79/-79/-83 dBc in 2,5 kHz Bandbreite (-113/-113/-117 dBc/Hz).

Zur Messung von Signal-Rauschabständen im NF-Bereich werden ein HP34401A RMS-DC-Voltmeter und ein W&G SPM-12 im Breitbandbetrieb eingesetzt. Der selektive Pegelmesser SPM-12 dient außerdem der Ermittlung des Senderrauschspektrums nach Umsetzung auf eine Zwischenfrequenz um Null.

Ein weiterer Meßsender simuliert das Nutzsignal.

9.2 Rauscharmer Quarzoszillator

Es handelt sich um einen Oberton-Quarzoszillator mit J310-FET-Oszillator, Pufferstufe mit BF960 und Leistungsverstärker mit BFG34. Mit einem Ausgangstiefpaß und einem 4-dB-Dämpfungsglied liefert die Baugruppe +20 dBm. Die Versorgungsspannung des Quarzoszillators ist nach dem Spannungsregeler noch einmal durch eine RC-Glied gefiltert.

Gegen den HP8642B mit nachgeschaltetem Full-Size-Topfkreisfilter für 144 MHz (DK8SG) wurde das Seitenbandrauschen im schlechtesten Fall zu -115/-126/-128 dB in 2,5 kHz Bandbreite (-149/-160/-162 dBc/Hz) bestimmt. Der Wert bei 20 kHz ist mit Sicherheit besser.

Bild 14zeigt die Baugruppe.

Bild 14 Rauscharmer Oberton-Quarzoszillator

9.3 Leistungskoppler zur Intermodulationsmessung

Zwei Signale mit +20 dBm werden über je einen Isolator auf den Koppeler geführt, der zum gemeinsamen Ausgang eine Dämpfung von je 40 dB aufweist. So entsteht eine Zweitonsignal mit bis zu 2 x -20 dBm und mindestens 100 dB Intermodulationsabstand, mit dem sich Eingangs-IPs bis über 20 dBm einwandfrei messen lassen.

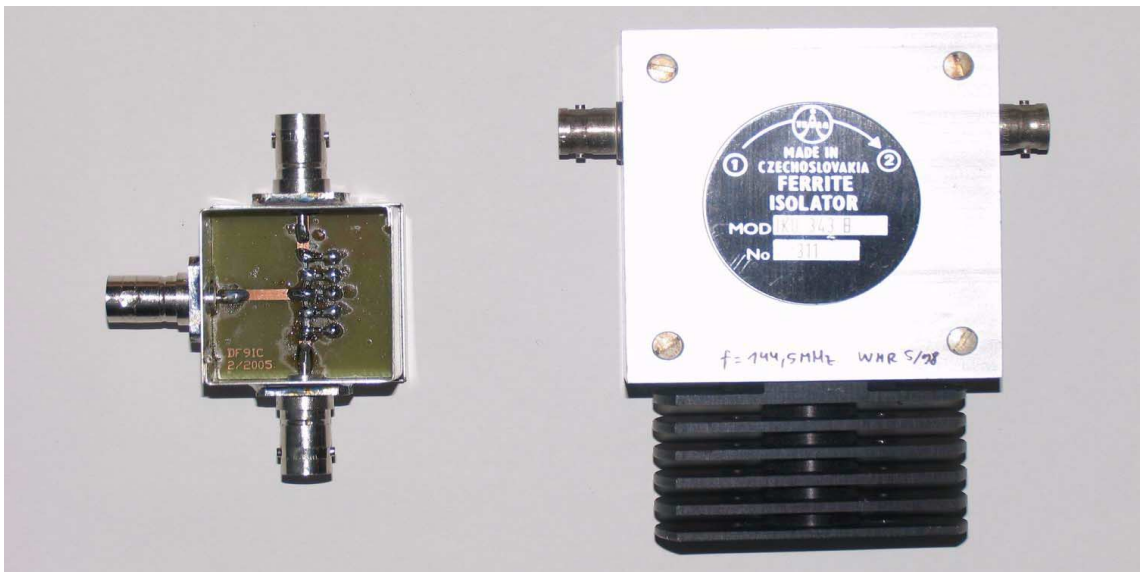


Bild 15 Leistungskoppler und Isolator

9.4 Anpaßverstärker mit Hochpaßfilter

Das Senderspektrum wird mit dem rauscharmen Quarzoszillator als LO und einem +17-dBm-Mischer direkt in die NF-Lage umgesetzt. Als Mischerabschluß wird ein FET-Verstärker mit anschließendem passiven LC-Hochpaßfilter verwendet, das ab 20 kHz bis über 200 kHz weniger als 1 dB Dämpfungsverzerrung aufweist und bei 10 kHz mindestens 30 dB Unterdrückung liefert. Ein OPV hebt das NF-Signal auf einen für den SPM-12 geeigneten Pegel an.

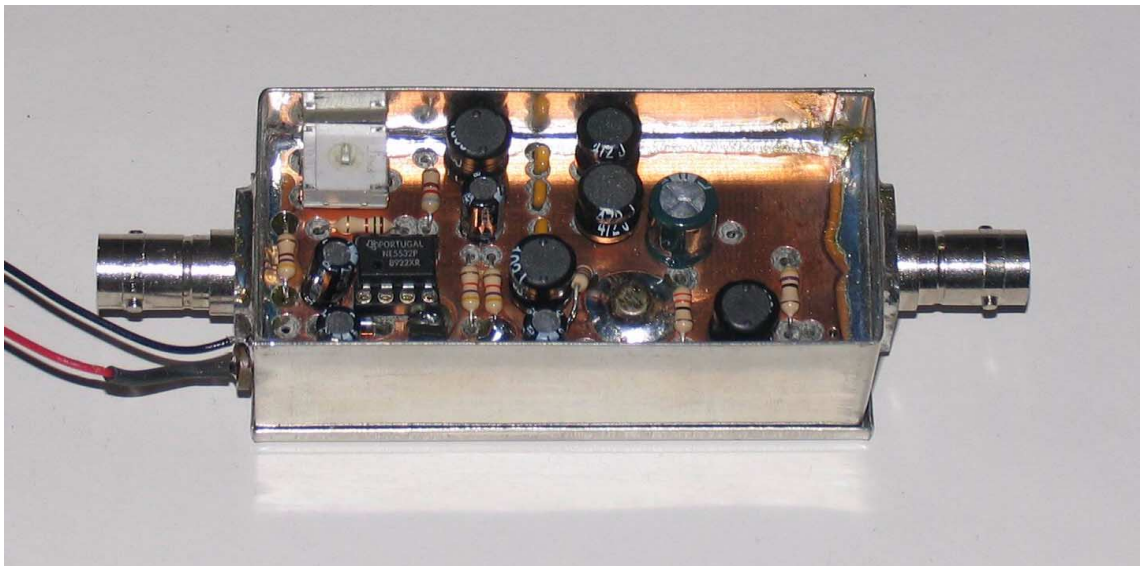
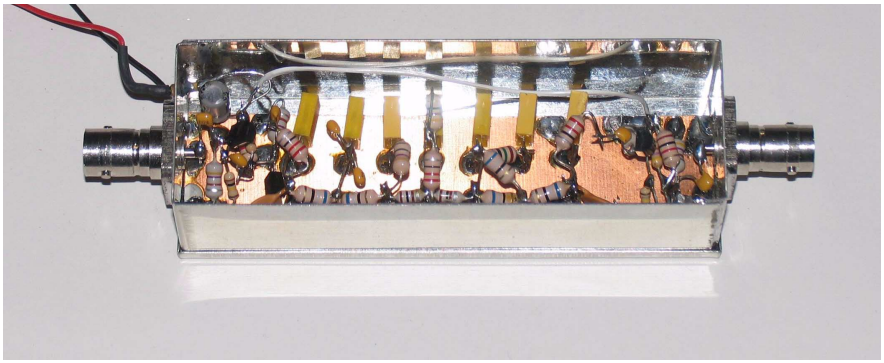
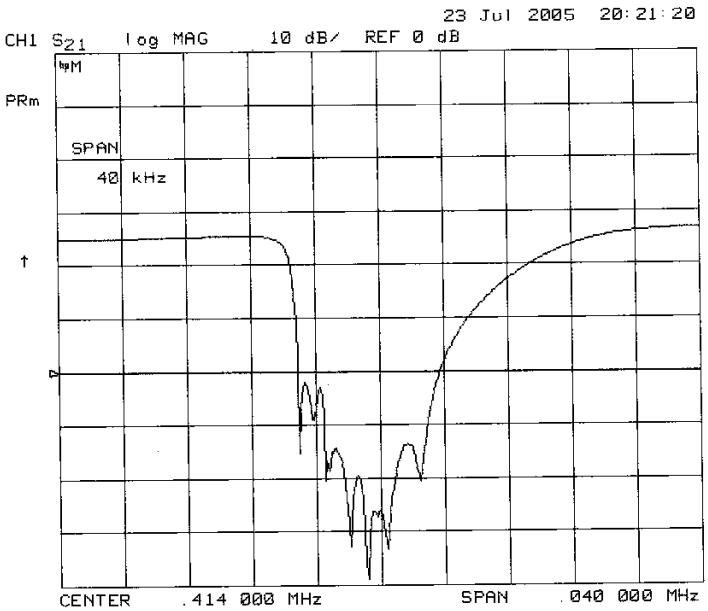


Bild 16 Anpaßverstärker

9.5 Notchfilter für Messungen mit dem Spektrumanalysator





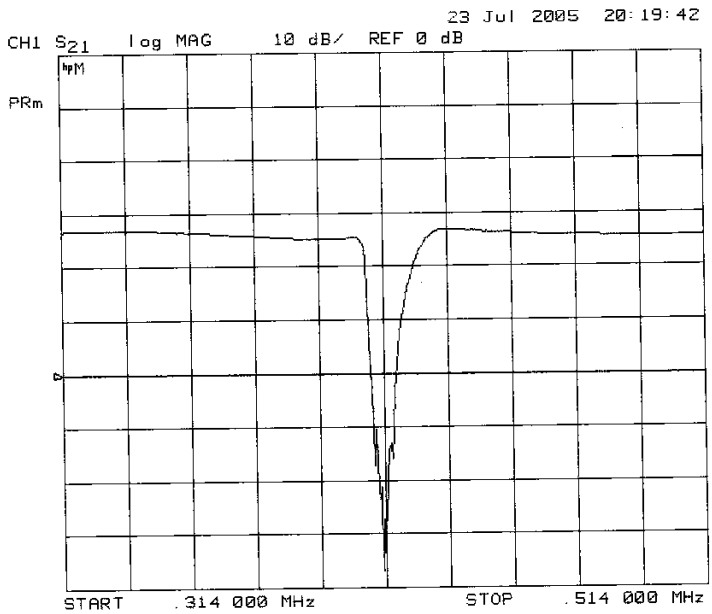


Bild 17 Notchfilter, aufgebaut mit Keramikresonatoren und Ein-/Ausgangspuffer mit J310: Photo und Übertragungsfunktion