

Der HF-/VHF-Transceiver PT-8000



Klaus Lohmann, DK7XL

In diesem Teil werden einzelne Baugruppen des Transceivers PT-8000 beschrieben.

Bild 5 (siehe Teil 1) gibt den Aufbau des PT-8000 stark vereinfacht als Blockschaltbild wieder. Einige Besonderheiten zur Technik werden im Folgenden ausführlicher erläutert.

Rauscharmer 1. Oszillator

Um überhaupt in den Genuss der Großsignalfestigkeit der Mischer bei kleinen Signalabständen zu kommen, ist ein

Zweites notwendig: Das Phasenrauschen des 1. und auch 2. Oszillators (LO1/LO2) muss so gering wie möglich sein, um auch in wenigen kHz Abstand von starken Fremdsignalen noch hohe Empfindlichkeit aufzuweisen. Das gilt gleichfalls für die Qualität der Prüfsignale – selbst teure Signalgeneratoren sind in ihrem Phasenrauschen einfachen Quarzgeneratoren, und nur die kommen bei diesen Messungen infrage, deutlich unterlegen.

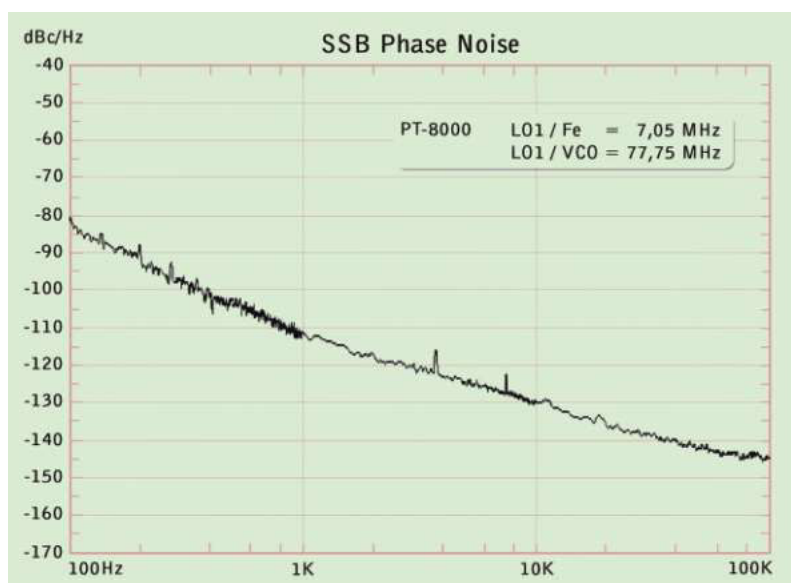
Anders als noch im ersten Prototyp verfügt der PT-8000 heute über einen 1. Oszillator (LO1), der von einem Mikrowellen-VCO abgeleitet ist. Vier VCOs arbeiten abgestuft zwischen 1...2 GHz; die anschließende Teilung des Signals durch 16 (bis 54 MHz) bzw. acht (für VHF) verbessert das Phasenrauschen

des bereits im Mikrowellenbereich rauschoptimierten Oszillators um $20 \times \log$ (Teilverhältnis) – hier also um 24 dB bzw. 18 dB. Zur absoluten- und Langzeitstabilität wird ein auf Stratum 3 gefertigter 20-MHz-Referenzoszillator (TCXO) mit einer Frequenzstabilität von besser 0,05 ppm zwischen 10...60 °C eingesetzt. Da der TCXO mit einem DDS gekoppelt ist, kann seine absolute Genauigkeit durch Software in 12-mHz-Schritten leicht korrigiert werden. Zusätzlich werden seine Rauschseitenbänder durch ein 300 Hz schmales Quarzfilter um ca. 20–50 dB abgesenkt. Das Ergebnis ist in **Bild 6** abzu-

lesen. Deutlich zu sehen ist der stetige Abfall der Rauschleistung – anders als oft zu beobachten pegelt sich der Rauschabstand nicht auf eine Konstante ein. Bei 50 kHz Abstand beträgt er –145 dBc. Der PT-8000 hat die Möglichkeit, selbst eine 10-MHz-Referenz auszugeben bzw. sie extern heranzuziehen und durchzuschleifen – wichtig für den Betrieb von Mikrowellentransvertern. Die interne Referenz arbeitet für alle Oszillatoren synchronisiert weiter auf 20 MHz.

Wesentlichen Anteil an der spektralen Reinheit des variablen 1. Oszillators, der auf HF von 70,7...124 MHz und für VHF von 180...240 MHz arbeitet, hat neben der Mikrowellenbasis, dem hochwertigen Referenzsignal, auch eine aufwändige PLL. Eine Besonderheit an der PLL ist, dass die heruntergeteilte Mikrowellenfrequenz (LO1) den Takt (Clock) für einen 400-MHz-DDS-Bau-

Bild 6:
Rauschseitenband
des LO1



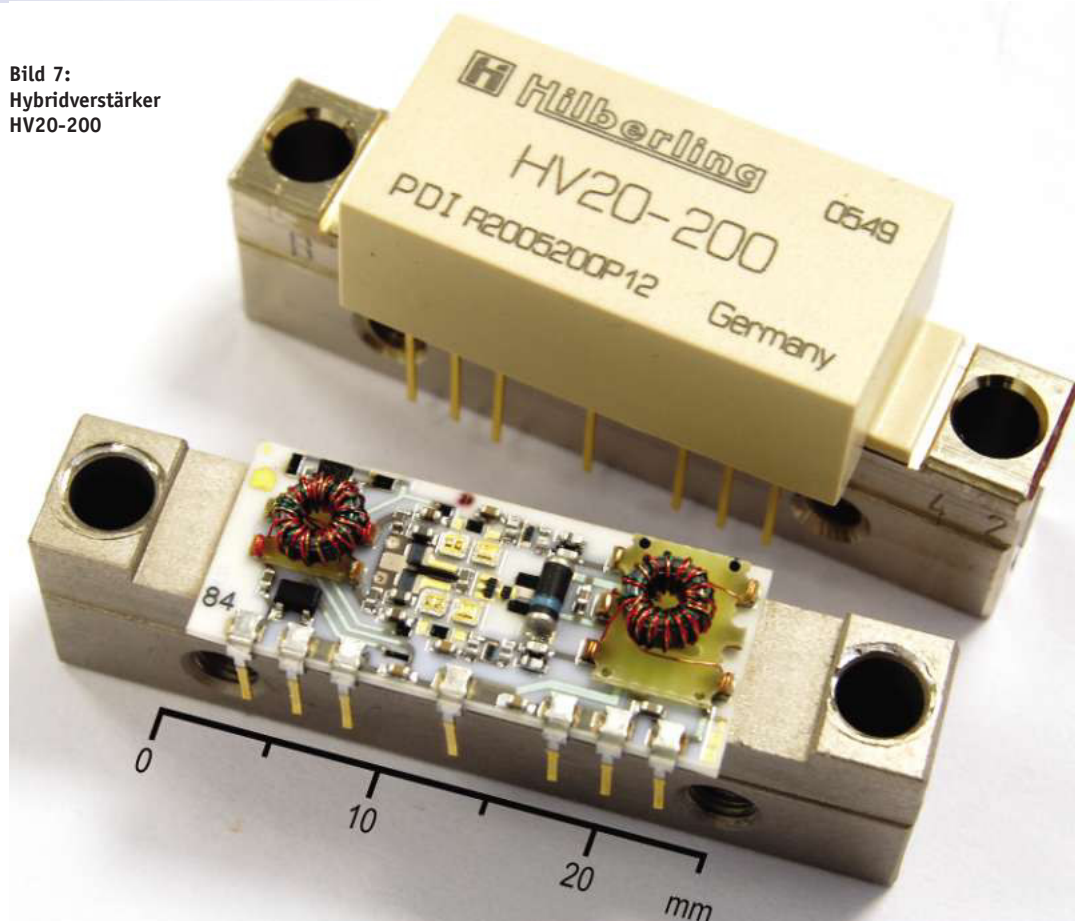
stein darstellt. Der DDS hat die Aufgabe, immer ein 20-MHz-Signal zu produzieren, das mit der TCXO-Referenz 20 MHz über einen 800 MHz schnellen Phasendetektor (PD) verglichen wird und so der VCO des LO1 über die gewonnene Regelspannung vom PD nachgesteuert werden kann.

Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass das geringe Seitenbandrauschen des DDS-Phasenakkumulators für die Abstimmung des VCO des LO1 genutzt werden kann. Der Aufwand an digitalen Baugruppen ist durch den DDS deutlich reduziert, es entfallen programmierbare Vorteile. Unerwünschte Weitab-Spektren des DDS (die bei jedem DDS entstehen) kommen nicht zum tragen, da sie außerhalb der Regelschleife anfallen und dort durch das Loop-Filter leicht ausgeblendet werden können. Die Rauschseitenbänder des LO2 dürfen ebenfalls nicht außer Betracht gelassen werden. Hier wird beim PT-8000 durch die Verwendung eines DDS mit nachgeschalteten 4 kHz breiten Quarzfiltern hinter dem LO2 vorgesorgt.

HF-/VHF-Vorverstärker für jede Antenne

Der PT-8000 besitzt vor den Empfängern ein Antenneneingangsteil. Drei Antennen können angeschlossen werden – für alle drei Antennen ist ein Vorverstärker (Hybridverstärker) vorhanden. Der Aufwand hat seine Berechtigung: Im Interesse höchstmöglicher Flexibilität sollen zwei Antennen von 1,8 MHz bis 54 MHz und eine VHF-Antenne beliebig zwei Empfängern zugeordnet werden können. Der gleichzeitige Betrieb von zwei Empfängern an einer Antenne hat den Nachteil, dass dies 3 dB Empfindlichkeitsverlust bedeutet. Diese Verluste wären unwiederbringlich, sodass der PT-8000 sich der Vorteile der neuartigen Hybridverstärker (Bild 7) bedient und unmittelbar nach der Antenne (über Hochpass 1,8 MHz und Tiefpass 54 MHz) breitbandig verstärkt. Die drei Hybridverstärkerstufen (HV20-200; $2 \times 1,8\text{--}54\text{ MHz}$; $1 \times 144\text{ MHz}$) arbeiten mit 10 dB Verstärkung (18 dB auf VHF), besitzen einen Ausgangs-IP3 von +50 dBm und eine Rauschzahl von 1,8 dB. Die (Ruhe)Stromaufnahme beträgt immerhin 350 mA – also 3,6 W Verlustleistung. Die Bauelemente der Verstärker sind auf Keramiks substrat angebracht. Im PT-8000 spielen diese Verstärker eine herausragende Rolle – ins-

Bild 7:
Hybridverstärker
HV20-200



gesamt werden sie in den Empfängern fünfmal eingesetzt. Ein Hybridverstärker mit 24 dB Verstärkung wird auch im Sender genutzt (HV24-200).

Diese Verstärker ermöglichen die auf den ersten Blick ungewöhnliche Konfiguration, dass der Preselektor hinter dem (zuschaltbaren) Vorverstärker angeordnet ist. Will man aber konsequent die beiden gleichwertigen Empfänger nutzen – erst unter dieser Bedingung macht der Aufwand Sinn – dann muss dies bei uneingeschränkter Empfindlichkeit und völliger Unabhängigkeit hinsichtlich der Betriebsfrequenzen sowie der Antennenwahl für die beiden Empfänger zwischen 1,8–54 MHz bzw. 110–170 MHz möglich sein.

Der Preselektor

Für Jahrzehnte besaßen Amateurfunktransceiver breitbandige Eingangsteile bzw. Selektionsmittel, die zumeist auf die Amateurfunkbänder zugeschnitten waren. Jetzt setzen sich bei den Geräten der oberen Leistungsklasse wieder Preselektoren durch. Allerdings nicht mehr von Hand abgestimmt. So auch beim PT-8000. Bei einem ersten Blick auf die beiden Eingangsteile (Bild 3, Teil 1) fallen sofort die großen T-200-Ringkerne mit 51 mm Durchmesser auf, die man sonst Leistungsendstufen oder 1-kW-Baluns zuordnen würde. Es

sind die Hauptinduktivitäten der Preselektor-Serienkreise für den Bereich 1,8–30 MHz in den beiden Empfängern.

Untersuchungen haben ergeben, dass immer die Intermodulationseigenschaften der verwendeten Materialien und die Transformationsverhältnisse mit der Größe (Kernmasse) korrelieren, sodass für die Hauptinduktivität des Preselektors (IP3 +50 dBm) diese Kerngröße aus Carbonyl-Eisenkern geeignet ist. Der L/C-Kreis wird mit Hilfe einer internen Rauschquelle beim ersten Abgleich durch den gesamten Betriebsbereich gefahren (in bis zu 2 kHz Schritten – z.B. auf 160 m). Die Induktivitäten sind in fünf und die Kapazitäten in acht Segmenten binär abgestuft und werden mit Relais geschaltet.

Dieser Abgleich kann im Selbsttest jederzeit wiederholt werden. Mechanische Abstimmeelemente für C und/oder L entfallen deshalb. Die Werte für jede Betriebsfrequenz sind in einer Tabelle der Rx-CPU abgelegt. Zur Verteilerung der Flanken des L/C-Serienkreises wird der Preselektor durch Transformation der Ein- und Ausgänge niederohmig (bei ca. $3\ \Omega$) betrieben. Auf 160 m beträgt die Bandbreite des Kreises ca. 10 kHz für eine 6-dB-Absenkung. Auf 40 m sind es ca. 60 kHz und auf 10 m werden noch ca. 600 kHz erzielt. So

können Selektionseigenschaften von mehrkreisigen Systemen erreicht werden, ohne deren Nachteile (z.B. Gleichlauf) in Kauf nehmen zu müssen, und es kann kompromisslos auf Großsignalfestigkeit bei der Wahl der Bauteile gesetzt werden. Bereits 20 dB an Weitabselektion reichen aus, um die ohnehin großsignalfesten Mischer (1./2. Mischer IP3 +40 dBm) und Vorfilter bei den IMD3-Produkten um 60 dB zu entlasten. Das Ergebnis ist in **Bild 8** dargestellt.

Der Preselector ist durch Relais überbrückbar. Vor dem Vorfilter der 1. ZF und nach dem Hybridverstärker wurde an beiden Rx ein Ausgang geschaffen, an dem breitbandige Messungen (IP3-Messungen, Anschluss Spektrumanalysator und Panorama-Rx) gemacht werden können. Das hat den Vorteil, diese Messungen ohne AGC-Einflüsse und mit hohen Signalpegeln erledigen zu können. Ein gleicher Ausgang ist auf der 2. ZF nach dem IF-Notchfilter vorhanden. Der Empfangsbereich 9 kHz bis 1,8 MHz wird durch ein Tiefpassfilter selektiert. Für den Bereich von 110 MHz bis 170 MHz dienen ein 15-poliges Hoch- und ein 15-poliges Tiefpassfilter als Bandpassfilter.

Das Mischerkonzept

Der PT-8000 arbeitet als Doppelsuperhet. Das Empfangssignal wird über die erwähnten schaltbaren Vorverstärker und den schaltbaren Preselector auf den 1. Mischer geführt, der auf die 1. ZF von 70,7 MHz umsetzt. Vor dem anschließenden Hybridverstärker sorgt ein Diplexer für deutliche Entlastung der nachfolgenden Stufen von unerwünschten Spiegelspektren, die impedanzrichtig abgeschlossen durch Hochpässe auf 50-Ω-Absorber geführt werden. Nach der Verstärkung schließt sich eine erste in der Bandbreite wählbare Selektion mit 6-poligen Quarzfiltern (Vorfilter bzw. Roofing-Filter) an mit anschließender Mischung auf die 2. ZF von 10,7 MHz.

Diese Anordnung ist ungewöhnlich. Eigentlich erwartet man die Filterung nach dem Mischer. Allerdings würden sich hier die Mischverluste mit den Ver-

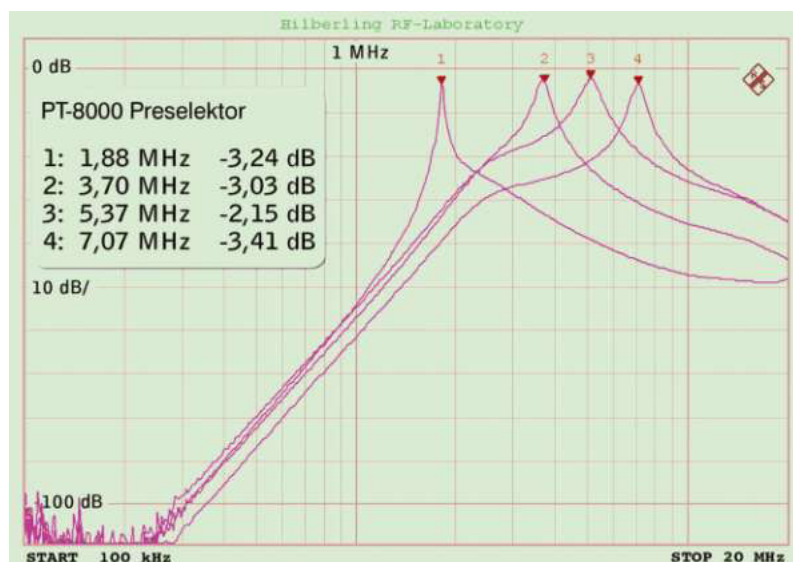


Bild 8: Dämpfungsverlauf des Preselectors bzw. HF-Eingangsteils

lusten in den Filtern addieren. Vorteilhaft für diesen Weg ist der Wegfall aktiver und damit Intermodulation provozierender Bauelemente im Umfeld des Mixers. Im PT-8000 wird dagegen hinter dem Mischer großsignalfest verstärkt – erst neue Bauteiltechnologien, die hier zum Einsatz kommen (die schon im Antenneneingangsteil vorgestellten Hybridverstärker), erlauben dies.

Die hohe spektrale Reinheit bei der Verstärkung und die geringe Rauschzahl von 1,8 dB bis in den Bereich 200 MHz ergeben so insgesamt bessere Signal-Rauschabstände und das ausgezeichnete Großsignalverhalten der Empfänger. Als Mischer wird ein für Hilberling GmbH entwickelter und gefertigter Mischer von Synergy Microwave Cooperation [9] eingesetzt, dessen Mischverluste von lediglich 7 dB durch die unmittelbar folgende Verstärkung ausgeglichen werden. Ein weiterer Vorteil der Platzierung des Verstärkers zwischen Mischer und Vorfilter ist die hohe Rückflussdämpfung bzw. Rückwirkungsfreiheit hinsichtlich der nachfolgenden Stufen auf den Mischer – die Reflektion von Signalen am Vorfilter wäre hierfür verantwortlich.

Die Intermodulationsprodukte von Signalen außerhalb des Durchlassbereichs der Vorfilter können also am Mischer wegen des zwischengeschalteten Verstärkers in Kombination mit Diplexern („Frequenzweichen“ – auch bekannt als „Split-Filter“) nicht mehr erscheinen. Diese Vorgehensweise trägt in der geringen Rauschzahl und der hohen Großsignalfestigkeit des Empfängers Früchte.

Für den Empfangsbereich unter 1,8 MHz wird anders als beim 1. Prototypen der bereits beschriebene Mischer eingesetzt, sodass auch hier entsprechende Empfangsleistungen wie im Bereich HF zur Verfügung stehen. Hinsichtlich des Großsignalverhaltens konnten bisher folgende Daten ermittelt werden. Die Messungen erfolgten wegen der Praxisrelevanz auf 7,100 kHz bei einem MDS von -122 dBm, 2,7 kHz Vorfilter und 500-Hz-Filter auf der 2. ZF (**Tabelle 1**).

Selektionsmittel: Quarzfilter und DSP

Nach der Selektion auf der 1. ZF von 70,7 MHz durch die drei Vorfilter erfolgt die Kanalselektion betriebsartenabhängig durch Quarzfilter auf der 2. ZF von 10,7 MHz. Angesichts des Trends, durch DSP-Schaltungen bei niedriger letzter ZF die Kanalselektion zu bewerkstelligen, geht der PT-8000 den „klassischen Weg“ über Quarzfilter – allerdings in ausgeklügelter Kombination mit einer DSP, die im nicht geregelten NF-Bereich, also nach den Demodulationsstufen, arbeitet.

Für die je nach Betriebsarten optimalen Bandbreiten stehen auf der 2. ZF von 10,7 MHz sieben diskret aufgebaute 16-polige Quarzfilter als Ladder-Filter zur Verfügung – insgesamt also 14 Quarzfilter in beiden Empfängern (**Bild 9**). Der hohe Aufwand, der hier getrieben wird, gilt in erster Linie nicht den erreichten Shape-Faktoren, die für Quarzfilter ausgezeichnet sind. DSP-Filter erreichen noch bessere Werte. Der Aufwand gilt vielmehr der Weitabselektion (auf 10,7 MHz) – hier

Tabelle 1

| | 2 kHz | 5 kHz | 10 kHz | 20 kHz | 100 kHz |
|--|-------|-------|--------|--------|---------|
| IMD DR3* | 86 dB | 97 dB | 104 dB | 108 dB | 113 dB |
| * Intermodulation Distortion Dynamic Range 3rd Order | | | | | |

Daten Großsignalverhalten

werden mehr als -115 dB bei 2 kHz von der Filtermitte erreicht. Die Quarzfilter sind von 500 Hz bis 6 kHz abgestuft und in Filterbänken organisiert.

Auf den Filterplatinen sind Verstärker integriert, die 50- Ω -Ein- und Ausgangsimpedanz ermöglichen. Main- und Sub-Empfänger haben eine um 4 kHz verschobene 2. ZF.

Da die Rx unabhängig voneinander nutzbar sind, ist so der ISB-Betrieb möglich. Bei der typischen SSB-Bandbreite von 2,4-kHz-Filtern weist das Filter einen Formfaktor von 1,3 (6 dB/60 dB Bandbreite) auf. Die Quarze sind speziell hergestellt; die Filterschaltung ist Rechner optimiert entwickelt. Diese Anordnung ist großsignalfest, um dem Aspekt der In-Band-Intermodulation gerecht zu werden. Ein manuell durchstimmbares Quarz-Notch-Filter auf 10,7 MHz steht ebenfalls zur Verfügung. Die Kerbtiefe beträgt ca. 50 dB bei 100 Hz Bandbreite; sie variiert durch eine mehrfach abgleichbare Quarz-Brückenschaltung nicht innerhalb des Variationsbereichs von 0,1 bis 4 kHz.

Zur Demodulation von DRM besitzt der PT-8000 einen 10-kHz-Ausgang, der nicht als „ZF“ vorliegt, sondern von der DSP in dieser (NF)Bandbreite zur Verfügung gestellt wird. Ein achtpoliges 50-kHz-Keramikfilter überbrückt dabei die Quarzfilterbänke auf der 2. ZF – sodass die Selektion durch das 12 kHz Vorfilter bei 70,70 MHz bestimmt wird.

DSP

Den Quarzfiltern ist nach der Demodulation (FM-Demodulator, ausgeführt als Quarz-Diskriminator; SSB-Produkt-detektor mit FET-Schaltern; AM-Quadraturdemodulator; AM-Synch. für LSB/USB) eine DSP nachgeschaltet, die den hohen Aufwand an Quarzfiltern noch zusätzlich unterstützt. Die DSP schafft Zwischenabstufungen (Interpolation) der verschiedenen Filterbandbreiten, sodass eine nahezu übergangslose Bandbreitenregelung von 50 Hz bis 12 kHz möglich ist.

Die Abstufungen variieren, die Zuordnung der jeweiligen Quarzfilter verläuft automatisch. Bei Quarzfiltern sind Phasenverschiebungen bzw. Gruppenlaufzeiten der Filter insbesondere im Bereich der Filterflanken unvermeidlich (bildlich gesprochen: Signale in Filtermitte passieren das Filter schneller als an den Flanken). Die DSP schafft hier Abhilfe, indem diese Effekte an den Fil-

terflanken ausgeblendet werden. Die Kombination der Filterumschaltung mit der DSP resultiert im übrigen in ein Passband-Tuning, das sehr bedienerfreundlich die Filtermitte gehörphysiologisch korrekt verschiebt, sodass die Bandbreitenanpassungen mit einem Bedienknopf ohne zusätzlicher Korrektur des Passbandes möglich sind. Die Quarzfilter werden in jeder Seitenbandlage völlig identisch betrieben, d.h., die BFO-Frequenz bleibt konstant.

Zur Seitenbandumschaltung wird der 2. Oszillator (LO2) für die Mischung auf 10,7 MHz von 60,0 MHz auf 81,4 MHz umgeschaltet – also die gespiegelte Frequenzlage genutzt. Die weiteren Aufgaben der DSP liegen auf der Hand: Automatisches Notch-Filter, das auch in sinnvollen Grenzen mit Mehrfachtönen fertig wird und eine Störgeräuschunterdrückung (NR, Noisereduction).

der 1. ZF und Störaustastung auf der 2. ZF) verdient auch einen kurzen Blick: Statt eines geregelten AM-Demodulators mit Puls-Demodulation wird im PT-8000 ein logarithmischer Verstärker eingesetzt. Über Hochpässe am logarithmischen Ausgang werden die Impulse ausgewertet und in der Schaltstufe zur Austastung genutzt. Die Laufzeit der Nutzsignale durch ein 30-kHz-Quarzfilter wird als Verzögerung genutzt, um wirksam vor Eintreffen des Störimpulses austasten zu können.

Zur Prüfung des Noise Blankers ist ein Impulsgenerator eingebaut. Eine an der Frontplatte regelbare Ansprechschwelle passt den NB an die jeweiligen Empfangsbedingungen an. Die Austasttiefe des NB liegt bei typ. -65 dB. Durch das Verfahren wird erreicht, dass selbst Signale mit 0 dBm (ca. $S9+70$ dB) Eingangspegel durch den NB keine Verzerrung erfahren.

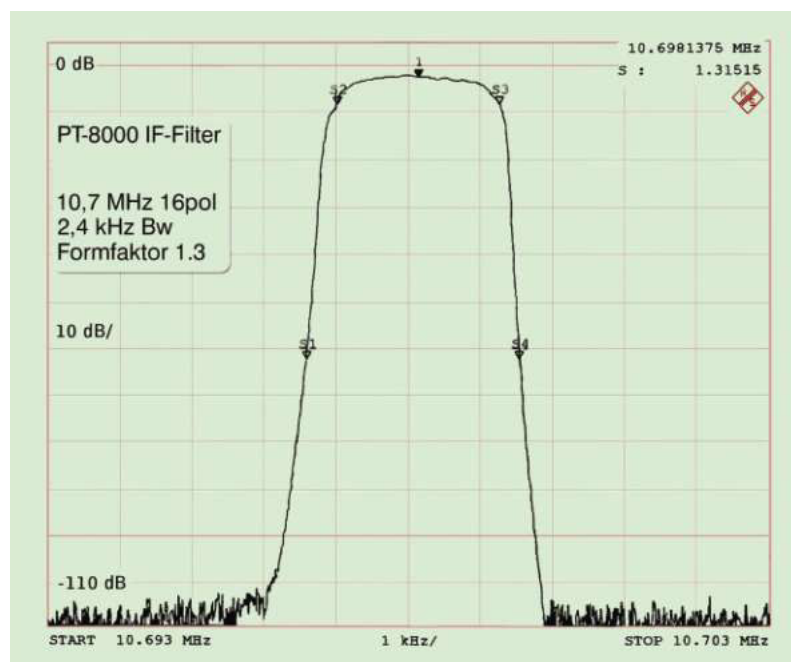


Bild 9: Dämpfungsverlauf des 16-poligen 10,7-MHz-Quarzfilters

Die DSP ermöglicht in Verbindung mit dem Sub-Rx die Realisierung eines „Band Monitors“ (BM). Der Zweck ist die Beobachtung weiter Frequenzabschnitte auf Aktivität mit einer Auflösung von 12 kHz. Die Betriebsart des Monitors kann aber ebenfalls auf Schmalband (CM, Channel Monitor) umgestellt werden – so können die Aktivitäten eines 12-kHz-Abschnitts mit 100 Hz Auflösung dargestellt werden.

Neuartige Störaustastung

Die Realisierung des Störaustasters (Noise Blanker – Signalabnahme auf

Interessant ist auch, dass bei 12-kHz-Vorfilter der NB optimal arbeitet: Die Störimpulse können durch schmalere Quarzfilter soweit „verrundet“ werden, dass sie der Nutzsignalcharakteristik (Modulation) ähnlich werden. Würde der NB mit diesen Signalen austasten (was hier durch die besondere Schaltungstechnik nicht der Fall ist), gäbe es die bekannten NB-Verzerrungen. Eine optimale Arbeitsweise stellt sich wie dargestellt bei 12-kHz-Vorfilter und einer Ansprechschwelle für Störsignalen von $\gg 1$ μ V ein.

(wird fortgesetzt)