

Der HF-/VHF-Transceiver PT-8000



Klaus Lohmann, DK7XL

Es ist sicher nicht alltäglich, dass in DL ein kommerzielles Sende-/Empfangs-Gerät für den Amateurfunk entwickelt wird – und zwar in der „Oberklasse“ dieses Genres. Der dreiteilige Artikel stellt keinen Test- oder Erfahrungsbericht dar, sondern gibt zu Konzeption und Aufbau des PT-8000 Auskunft.

Bei dem auch in drei Teilen immer noch begrenzten Umfang ist nicht einmal die Beschreibung aller Funktionen dieses komplexen Gerätes sinnvoll. Dem Leser sollen vielmehr Einblicke in die Entwicklung dieses Transceivers, der für den privaten und kommerziellen Gebrauch bestimmt ist, gegeben werden.

Vom Prototypen zum Serienmodell

Im Juni 2006 anlässlich der HAM RADIO in Friedrichshafen wurde der PT-8000 aus dem Hause Hilberling GmbH, Rendsburg in Schleswig-Holstein, erstmals der Öffentlichkeit präsentiert. Der Verfasser nutzt seit Mai 2006 einen Prototyp (100-W-Modell) im alltäglichen Gebrauch und hat zu ersten Eindrücken und Konzeption der Geräteserie PT-8000 berichtet [1, 2]. Anlässlich der HAMVENTION 2007 in Dayton, Ohio USA, wird ein weiteres Debüt erfolgen. Betrachtet man die Zeitspanne von der Erstvorstellung bis zur Auslieferung, wird deutlich, dass der PT-8000 nicht mit einer „Nullserie“ auf dem Markt erscheinen wird. Es sind eine Vielzahl von Anpassungen für die Serienfertigung vorgenommen worden, die

der Zuverlässigkeit sowie einer rationalen Fertigung dienen.

Gegenüber den ersten Prototypen haben sich folgende Veränderungen am PT-8000 ergeben:

- Neue für Hilberling GmbH entwickelte und gefertigte 6-polige-70,7-MHz-Vorfilter (Roofing-Filter) mit Bandbreiten von 2,7 kHz, 6 kHz und 12 kHz. Diese Filter werden sowohl in den Empfängern als auch im Sender eingesetzt.

- Optimierungen am Preselektor sowie an den Bandpässen für VLF/VHF
 - Abdeckung des Betriebsbereichs VHF (Rx) von 110–170 MHz
 - Neue (IP3 +40 dBm) Mischer von Synergy Microwave (SMC) für VLF/HF/VHF sowie deren Einsatz als 2. Mischer
 - Verwendung eines rauscharmen 1. LO abgeleitet von einem für Hilberling GmbH gefertigten Mikrowellen-VCO sowie ein geändertes Frequenzkonzept
 - Überarbeitung des Pegelplans und der AGC. Frontend mit „0 dB“ Verstärkung, erster AGC-Eingriff auf der 2. ZF
 - Umschaltungen im analogen Signalweg (Rx) ausschließlich durch Relais
 - Einsatz einer großen Anzahl moderner GHz-Halbleiter mit transformatorischer Gegenkopplung (Norton-Verstärker) im HF- und ZF-Signalweg
- Leitlinie für die (Weiter)Entwicklung des Transceivers war die Realisierung von Spitzentechnologie für den Amateurfunk im noch vertretbaren wirtschaftlichen Rahmen. Das Kriterium „wirtschaftlich“ darf dabei nicht zu eng gefasst werden, da es bei Detaillösungen auch um die Freude an technisch Machbarem ging. Hans Hilberling, DK7LG, der seit 25 Jahren in der Entwicklung von Funknachrichtengeräten für Luft- und Seefahrzeuge tätig ist,

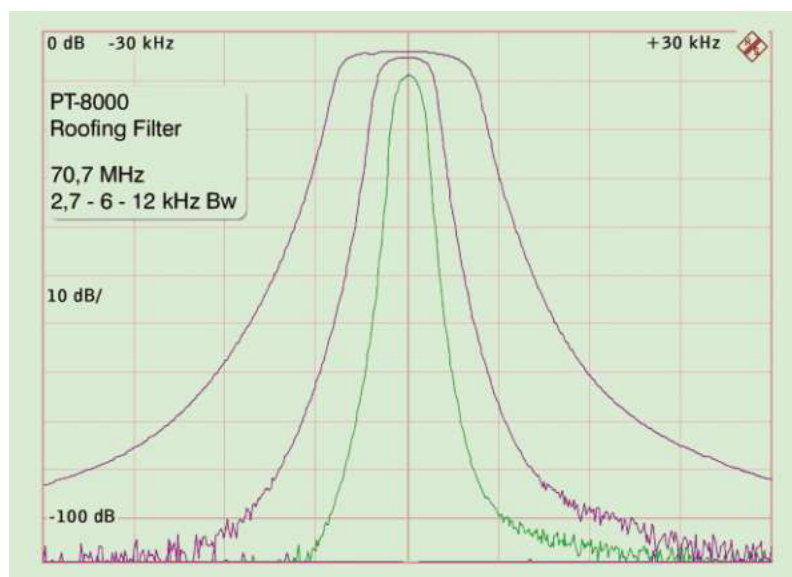


Bild 1:
Dämpfungsverlauf
der drei Vorfilter
(Roofing-Filter) mit
2,7–6–12 kHz
Bandbreite auf der
1. ZF von 70,7 MHz

zielte mit dem PT-8000 auf einen Transceiver „wie aus dem Lehrbuch.“

Grundkonzeption des PT-8000

Folgende Zielvorstellungen des Entwicklers haben die Grundkonzeption der PT-8000-Serie definiert:

1. Zwei gleichwertige Rx: Der PT-8000 ist ein Sender mit zwei absolut gleichwertigen und unabhängigen Empfängern für HF/VHF bzw. für die Amateurfunkbänder von 160 m bis 2 m.

2. VHF-Betrieb: Die Frequenzaufbereitungen und die verwendeten HF-Komponenten erlauben VHF-Betrieb, er ist nicht als „Zusatz“ eingebaut. Deshalb sind die Leistungen des Rx im VHF-Bereich mit denen für HF vergleichbar.

3. Transverterbetrieb: Durch die herausragenden Leistungen bis in den VHF-Bereich ist die Nutzung des PT-8000 als Plattform für unterschiedliche Transverter möglich (Skalierungstabellen bis 76 GHz sind in der Software abgebildet).

4. Vollwertiger ISB-Betrieb: Der ISB-Betrieb (Independent Sideband – unabhängige Modulation der beiden Seitenbänder eines DSB-Signals) eröffnet die Möglichkeit, gleichzeitig Sprache auf dem einen und z.B. Bildinformationen (SSTV) in dem anderen Seitenband zu übertragen. Dieser ISB-Betrieb erfordert aber in der Regel Bandbreiten über 2,7 kHz, sodass ein derartiger Einsatz des PT-8000 auf Grund der gesetzlichen Bestimmungen erst ab 28,500 MHz infrage kommt (außerdem Bandplan beachten).

5. Hybridtechnik: Nutzung von Digitaltechnik in Verbindung mit Analogtechnik.

6. Hohe Sendeleistung: Integration einer Hochleistungsendstufe (600 W) modernster Technologie mit nur zwei Transistoren. Möglichkeit zur Umschaltung auf ultralineaeren Betrieb des Tx bei reduzierter Leistung.

Der PT-8000 steht in drei Varianten als PT-8000A/B/C-Modell zur Verfügung, die sich ausschließlich in den Senderendstufen auf den Kurzwellenbändern unterscheiden. Das A-Modell verfügt über eine HF-MOSFET-PA mit 100 W bei 13,8 V. Im B-Modell sorgen zwei 100-V-HF-MOSFET (SD3933) für bis zu 600 W Output [3]. Das C-Modell arbeitet mit der Treiberstufe in A-Mode für 10 W Ausgangsleistung.

Großsignalverhalten von Empfängern

Zentrales Prüfkriterium für einen Empfänger (Rx) ist seine Fähigkeit, aus dem

elektromagnetischen Spektrum, das beträchtliche Feldstärken aufweisen kann, auch Signale in der Nähe der Grenzeempfindlichkeit (Minimum Discernible Signal – MDS) noch aufnehmen zu können. Diese Forderung ist umso anspruchsvoller, je geringer der Frequenzabstand von Fremdsignalen zum Nutzsignal in der Empfangspraxis tatsächlich ist, bzw. bei der Prüfung gewählt wird.

Die Großsignalfestigkeit oder der Dynamikbereich eines Rx kann durchaus mit den Fähigkeiten der menschlichen Sinne verglichen werden [4]: Unser Ohr ist in der Lage, einen 1-kHz-Ton bis hinunter zu einer Leistung von 10^{-12} W/m² aufzunehmen. Die Schmerzgrenze liegt bei einer akustischen Leistung von 1 W/m² – dies entspricht einem Dynamikbereich von 120 dB. Eine (Vinyl-)Schallplatte hatte übrigens 60–80 dB Dynamik. Noch größer fällt der Helligkeitsbereich unseres Auges aus: von 10^{-13} W/m² bis 300 W/m², also über 150 dB Dynamik! Hier drängt sich eine weitere Analogie auf: Schaut man nach einem schwach leuchtenden Objekt, das aus Richtung Sonne kommt, hat man genau die Situation, wie sie in der Empfängertechnik anzutreffen ist: Ein oder mehrere benachbarte starke Signale beeinflussen die Empfindlichkeit auf dem Nutzkanal (bekannt als „Blocking Dynamic Range“). Wählt man als Abhilfe eine Sonnenbrille (Abschwächer) – könnte aber das Objekt unterhalb der Empfindlichkeitsschwelle des Auges (bzw. Empfängers) abrutschen ... Aber zurück zum Rx: In den vergangenen Jahren hat sich bei der Ermittlung des Großsignalverhaltens ein Abstand der beiden Prüfsignale zueinander bis herunter zu 2 kHz durchgesetzt. Damit wird die

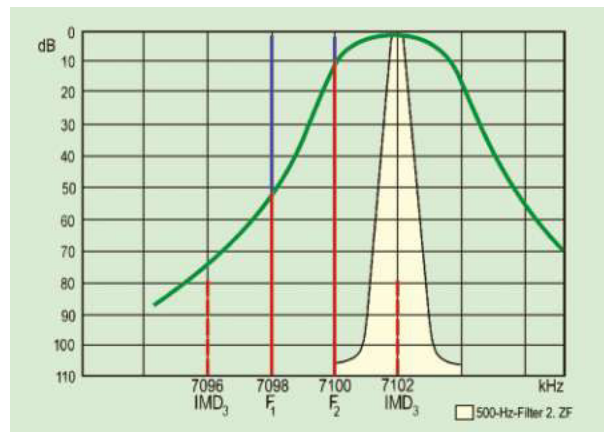


Bild 2: Wirkungsweise des 2,7-kHz-Vorfilters (tatsächlicher Dämpfungsverlauf). Die Höhe der IMD3-Produkte ist angenommen. Die Kanalselektion auf der 2. ZF ist schematisch dargestellt (gelb)

Problematik von Intermodulationsprodukten (IMD) bei Doppelsuperhets (und das ist immer noch das am häufigsten angewandte Prinzip) „tiefer in den Rx hineingetragen“.

Bei Abständen von über 20 kHz können die ersten Selektionsmittel (z.B. Preselektor) eines der Fremdsignale (vor allem auf den unteren Bändern) noch ausblenden bzw. entscheidend abschwächen. Bei Doppelsuperhets ist Abhilfe auch auf der 1. ZF möglich. So hat sich, mit der Verfügbarkeit von (bezahlbaren) Quarzfiltern für die hohe 1. ZF, der Name Roofing-Filter als spezielles Selektionsmittel gegen Intermodulationsprodukte, die in den nachfolgenden Stufen erzeugt werden, eingebürgert. Für unseren Sprachraum wäre die Bezeichnung „Vorfilter“ (Filter vor den Kanalfiltern der letzten ZF) wesentlich treffender und allgemein verständlich. Der zweite Mischer wird entlastet und die IMD-Produkte entstehen nicht bzw. sind nicht mehr messbar. Allerdings – trotz eines 6-kHz-Vorfilters werden bei 2 kHz Signalabstand die Fremdsignale zum zweiten Mischer

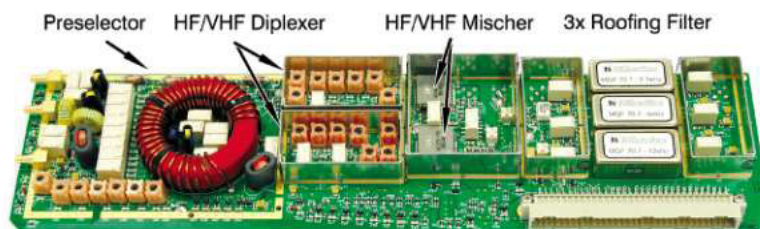


Bild 3: Frontend der Rx des PT-8000

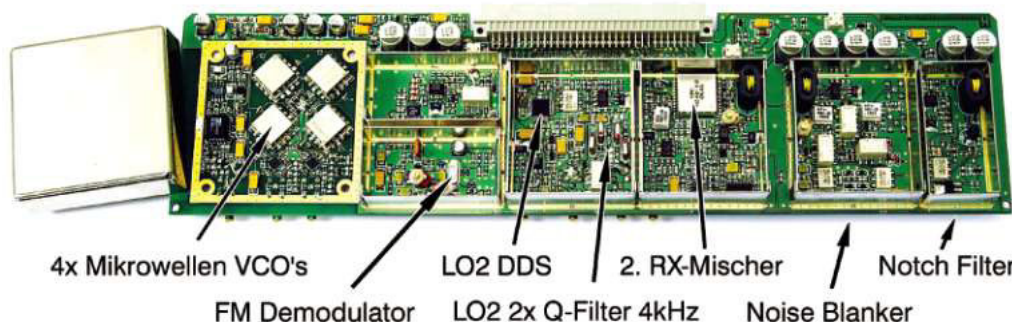


Bild 4: Ansicht einer Empfänger-Baugruppe

durchgereicht. Die Anforderungen an seine Großsignalfestigkeit sind nun ebenso hoch wie beim 1. Mischer. Bei den nun entstehenden unerwünschten Mischprodukten spricht man von „In-Band“-Intermodulation. Das obere IMD3-Produkt liegt 2 kHz über dem frequenzhöheren Fremdsignal – das untere 2 kHz niedriger als das frequenz tiefere Fremdsignal oder: $2f_1 - f_2$ und $2f_2 - f_1$. Bei einem 6-kHz-Vorfilter können so gerade noch beide IMD3-Signale im Nutzkanal (egal mit welcher Bandbreite!) der 2. ZF hörbar auftauchen.

Eine Abhilfe ist konzeptionell möglich, z.B.:

1. Ein Einfachsuper hat diese Probleme prinzipiell nicht. Diesen Weg ist z.B. Ten-tec mit dem Orion gegangen. Aber: nichts ist in der Physik umsonst, die Spiegelfrequenzunterdrückung und ZF-Durchschlagfestigkeit werden jetzt insbesondere bei einem Rx, der lückenlos den Kurzwellenbereich abdecken soll, zur Herausforderung (das war historisch der Grund für die Favorisierung der hohen 1. ZF!) und ist der Preis für diese Lösung.

2. Direktmischer sind ebenfalls immun gegen In-Band-Intermodulation. In der Nachrichtentechnik setzen sich immer mehr „Low-IF“ oder „Zero-IF“-Konzepte durch – das weckt Erinnerungen an die Direktüberlagerungstechnik. Bei dieser Methode liegt die Oszillatorfrequenz auf der Empfangsfrequenz, sodass sich als Mischprodukt direkt die Niederfrequenz bzw. das Baseband ergibt (also eine „Zwischenfrequenz“ von 0 Hz oder wenigen kHz). Der wesentliche Nachteil war, dass die Spiegelfrequenzen gleichermaßen ent-

stehen und mit analogen Schaltungstechniken nur schwer beherrschbar sind – die Direktüberlagerung rückte deshalb viele Jahre in den Hintergrund. Die Quadraturmodulation/-demodulation in Verbindung mit der digitalen Signalverarbeitung verschafft dieser Technik aber grundsätzliche Vorteile und hat diesem (alten) Konzept wieder Aktualität verschafft. So kann man heute durchaus sagen, dass die Digitalisierung des Signals „immer näher an der Antenne erfolgt“ – die klassischen analogen Eingangsteile (Frontend) der Empfänger schrumpfen. Diese Empfangs- bzw. Sendesysteme werden in ihrer Funktionalität weitgehend durch Software definiert mit den Vorteilen höchster Flexibilität. Auch diese Technik, die in der kommerziellen Nachrichtentechnik heute unverzichtbar ist, hält vermehrt Einzug in die Amateurfunktechnik, dort bekannt als „Software Defined Radio“ [5, 6].

Roofing-Filter – ein Allheilmittel?

Wenn diese konzeptionellen Auswege nicht infrage kommen, liegt es nun nahe, sich eines noch schmaleren Vorfilters zu bedienen – diesen Weg beschreitet Icom mit dem IC-7800, der in seiner überarbeiteten Version mit einem 3-kHz-Roofing-Filter ausgestattet ist. Die ARRL berichtete in der Märzangabe der QST von den Ergebnissen [7].

Der PT-8000 verwendet ein 6-poliges Vorfilter mit 2,7 kHz Bandbreite, was zurzeit die physikalische Grenze für 70-MHz-Quarzfilter darstellen dürfte. Seine drei Vorfilter mit 2,7 kHz, 6 kHz und 12 kHz Bandbreite haben unterschiedliche Durchgangsdämpfungen und Formfaktoren, wie aus **Bild 1** ersichtlich. Die idealtypische Wirkungsweise dieser noch schmaleren Vorfilter ist in der **Bild 2** dargestellt: Zwei Signale mit 2 kHz Abstand können nun nicht mehr ungedämpft das Filter passieren. Je nachdem, wie das Vorfilter platziert ist (das ist von der Betriebsart abhängig, bei CW liegt das 500-Hz-Filter in der Mitte des Vorfilters, bei SSB mit jeweils einer Flanke of Zero Beat). Eines oder beide Signale liegen jetzt auf der Filterflanke und entlasten den nachfolgenden Mischer durch einen geringeren Signalpegel – seine IMD-Produkte sind entsprechend geringer. Allerdings – dies ist eine idealtypische Betrachtung (gleichsam die Perspektive „von hinten“ durch die Filter), die davon ausgeht, dass sich die Vorfilter „passiv“ verhalten. Abgesehen von Gruppenlaufzeiten der Filter und damit verbundenen

Phasendrehungen der Signale verhalten sich die Quarzfilter leider nicht so passiv wie gewünscht – je schmaler die Filter ausgelegt werden, desto mehr neigen sie dazu, nun ihrerseits IMD zu produzieren! Quarzfilter auf dieser hohen Frequenz bestehen aus Oberschwingern, die bezüglich ihrer Neigung IMD zu erzeugen tendenziell schlechter sind als Grundwellenquarze – physikalische Grenzen dieser mechanischen Biegeschwinger werden hier erkennbar. In dem Bericht von Werner Schnorrenberg [8] zum Großsignalverhalten des Icom-7800 (die erste Version) wunderte er sich, dass der IP3 bei Auswahl des breiteren Roofing-Filters besser war, als mit dem schmalsten, damals noch 6 kHz breiten Filter. Die Antwort könnte der eben beschriebene Sachverhalt sein.

Worauf kommt es also an? Die Kette der aktiven – und wie eben festgestellt auch der passiven – Bauelemente müssen in der Summe das angestrebte Großsignalverhalten gewährleisten. Das ist der Grund, warum im PT-8000 der 1. und 2. Mischer mit typischem IP3 +40 dBm identisch sind.

Die Vorfilter werden für Hilberling GmbH speziell in 50-Ω-Technik gefertigt. Sie müssen im Pegelplan des Empfängers so eingebunden werden, dass ihr IP3 das Gesamtergebnis nicht verschlechtern kann und ihre Filterwirkung (Abschwächung mindestens eines der beiden Signale) den nachfolgenden Mischer entlastet. Fazit: Die Vorfilter (Roofing-Filter) stellen per se kein Allheilmittel bezüglich der Verbesserung des IMD bei kleinen Signalabständen dar – ihre Verwendung bedarf der sorgfältigen Berücksichtigung der gesamten HF-Signalverarbeitungskette. Eingangsseitig werden die Vorfilter mit der vollen HF-Summenspannung der Prüf- bzw. der Störsignale belastet. Ein optimaler Dynamikbereich unter Verwendung von schmalen Vorfiltern kann sich nur einstellen, wenn die Empfindlichkeit auf die jeweiligen atmosphärischen Rauschgrenzen angepasst wird.

Anders sind die Verhältnisse, wenn man sich dem Kriterium Blocking Dynamic Range (BDR) zuwendet. Wird das Prüf- bzw. Störsignal (hier handelt es sich ja nur um ein Signal) durch das Vorfilter entscheidend abgedämpft, steigt die BDR deutlich an. Die BDR-Messungen müssen dann allerdings auch in entsprechenden Abständen erfolgen ($\gg -3$ dB Bandbreite des Vorfilters).

(wird fortgesetzt)

Literatur und Bezugsquellen

- [1] Klaus Lohmann, DK7XL: „Deutsche Spitzentechnologie: HF-/VHF-Transceiver PT-8000 – analog und digital im Team“, Funkamateure 7/06, S. 762ff.
- [2] Klaus Lohmann, DK7XL: „Der HF-/VHF-Transceiver PT-8000“, Praxisheft 17, Arbeitskreis Amateurfunk und Telekommunikation in der Schule e.V., S. 18ff.
- [3] Technische Daten SD3933 unter www.st.com
- [4] Leif Asbrink, SM5BSZ: „Blocking Dynamic Range in Receivers“, ARRL QEX Ausgabe 4/04–06, S. 35ff.
- [5] Klaus Lohmann, DK7XL: „Erste Erfahrungen mit dem SDR-1000“, CQ DL 7/04, S. 494ff.
- [6] Klaus Lohmann, DK7XL: „Digitale Zukunftstechnik fürs Shack?“, CQ DL 2/06, S. 112ff.
- [7] Product Review IC-7800“, ARRL QST Ausgabe 3/07, S.60ff.
- [8] Werner Schnorrenberg: „Test von In-Band-Intermodulationsfestigkeit“, CQ DL 8/05, S. 544ff.
- [9] siehe www.synergymwave.com
- [10] Technische Daten PT-8000 siehe www.hilberling.de
- [11] Leif Asbrink, SM5BSZ: „IMD in Digital Receivers“ in ARRL QEX 11 und 12/06, S. 18ff.
- [12] Doug Smith, KF6DX: „In Search of New Receiver-Performance Paradigms, Part 1“, ARRL QEX, 11 und 12/06, S. 23ff. sowie Part 2 ARRL QEX 1 und 2/07, S. 23ff.

