Praxistest (1)

Die Leistungsendstufe HPA-8000B von Hilberling

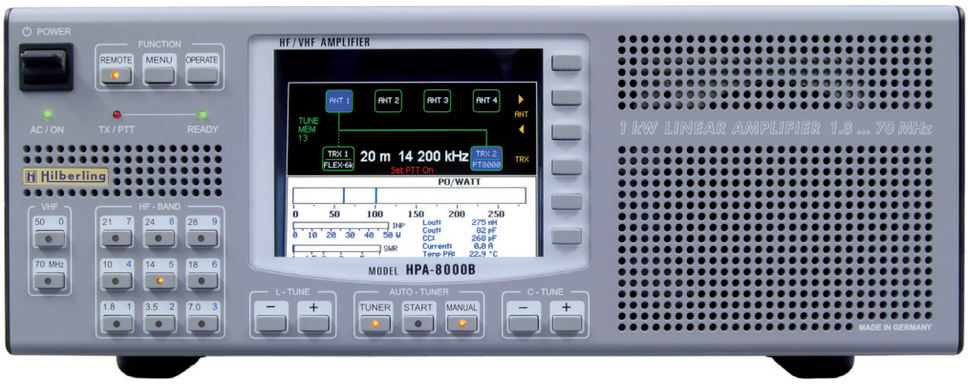

Bild 1: Die Endstufe HPA-8000B wird bei Rendsburg/Schleswig-Holstein gefertigt. Sie kann farblich zum PT-8000A abgestimmt geliefert werden, ist aber auch mit anderen Transceivern nahezu universell einsetzbar. Die PA des Verfassers hat die Seriennummer 16050120 und wurde im Mai 2016 erworben

Klaus Lohmann, DK7XL

Der Hilberling HF/VHF-Transceiver PT-8000A [1] ist seit einigen Jahren weltweit im Gebrauch und entspricht den hohen Erwartungen der Erwerber. Seit 2016 steht nun die in Design und Technik zum PT-8000A angeglichene Leistungsendstufe HPA-8000B zur Verfügung und damit ein weiteres hochwertiges Produkt eines in Deutschlands ansässigen kommerziellen Amateurfunkgeräte-Entwicklers. Die Endstufe bietet aber weit mehr, als nur das passende Pendant zum PT-8000A zu sein. Mit rund 6000 € Anschaffungskosten im oberen Preissegment angesiedelt, stellt sich die Frage, ob die Leistungen und das neue Konzept ihr Geld wert sind.

Die HPA-8000B [2] kann beim Hersteller in Rendsburg direkt abgeholt werden – was sicherlich im Interesse einer ausführlichen Einweisung zu empfehlen ist. Aber auch ohne persönliche Einweisung durch den Hersteller kommt man mit dem ausführlichen Handbuch gut zurecht – die Bedienung und das Softwareupdate sind gut verständlich beschrieben.

Das Verkaufsprospekt zur Endstufe enthält darüber hinaus ein Blockschaltbild, das die Grundkonzeption der Endstufe darstellt. Es ist nicht mehr die Regel, dass der Käufer detaillierte Schaltungsunterlagen bei Amateurfunkgeräten vorfindet – auch für die HPA-8000B stehen sie nicht zur Verfügung.

Angesichts der Komplexität und Softwaresteuerung dieser Endstufe und der ohnehin fehlenden Möglichkeit (außer bei trivialen Problemen) selbst Hand anzulegen, ist dies aus praktischer Sicht zu verschmerzen – aber es bleibt das hohe Interesse an der Schaltungstechnik unbefriedigt. Deshalb wird in diesem Artikel mehr als nur über die Leistungsdaten der HPA-8000B berichtet werden. Für die Auskunftsbereitschaft sei an dieser

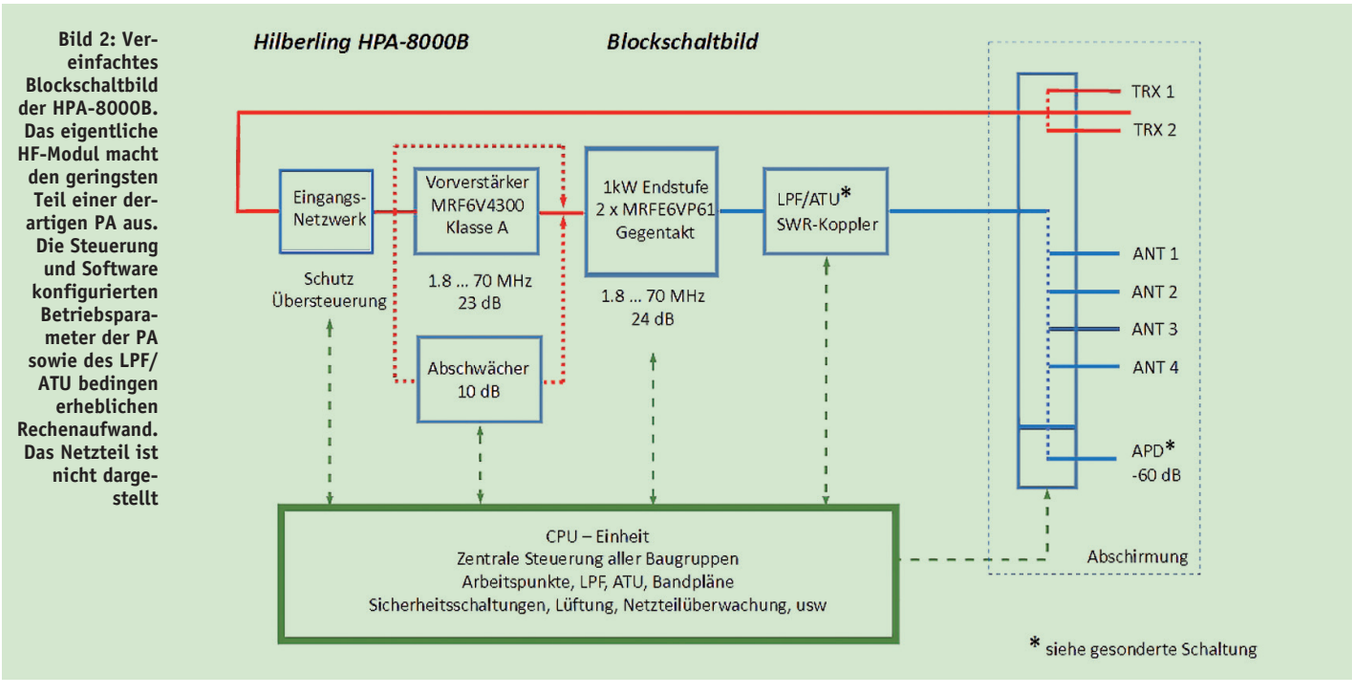

Bild 2: Vereinfachtes Blockschaltbild der HPA-8000B. Das eigentliche HF-Modul macht den geringsten Teil einer derartigen PA aus. Die Steuerung und Software konfigurierten Betriebsparameter der PA sowie des LPF/ATU bedingen erheblichen Rechenaufwand. Das Netzteil ist nicht dargestellt

Stelle dem Entwickler Hans Hilberling, DK7LG, gedankt. Nach seiner Einschätzung wäre z.B. die nahezu leistungslose –60-dB-Auskoppelschaltung durchaus patentwürdig. Hans Hilberling hat sich aber entschieden, sein Wissen der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen.

Der Postversand der ca. 20 kg schweren Endstufe **(Bild 1)** gestaltet sich problemlos – die professionelle Verpackung gibt wenig Anlass zur Sorge. Allerdings werden für die Verpackung 75 € berechnet, die sich aber später auszahlen und den OM ruhig schlafen lassen, sollte das Gerät – wie beim Verfasser geschehen – nochmals in das Mutterhaus zum Service versandt werden müssen.

Die HPA-8000B ist auf der Internetseite der Fa. Hilberling sehr gut dokumentiert. Detaillierte Ansichten der Hardware und das Verkaufsprospekt geben einen ausführlichen Eindruck. In diesem Artikel kann deshalb auf umfangreiches Bildmaterial der PA zugunsten bisher nicht veröffentlichter Details verzichtet werden.

Der erste Blick soll dem Konzept der PA gelten – wo liegen die Besonderheiten und welche Vorteile hat dies für den Nutzer? In der zweistufigen Endstufe kommen für Treiber und PA so genannte LDMOS-Systeme zum Einsatz. In der Amateurfunktechnik werden aus dieser Gruppe u.a. BLF188XR, BLF578, NXP MRFE6VP61K25 wie im Falle der HPA-8000B oder der jüngst erschienene MRF1K50H mit 1500 W Leistung eingesetzt [3 und 4].

Letzterer findet in der neuen 1,5-kW-Endstufe von FlexRadio Systems Verwendung – über sie wird in Kürze an dieser Stelle ebenfalls berichtet werden [5].

LDMOS-PA mit zwei Verbundsystemen

Die HPA-8000B nutzt zwei dieser seit einigen Jahren zur Verfügung stehenden LDMOS-Halbleiter. Sie zeichnen sich u.a. durch verringerte Eingangskapazität und eine hohe Source/Drain-Durchbruchspannung aus.

So kann die PA mit 50 V betrieben werden, was den Netzteilaufwand und die Gestaltung des Ausgangstrafos gegenüber der 13,8-V-Technik deutlich vereinfacht. Die zum Einsatz kommenden LDMOS stellen Verbundsysteme (Zwillings- oder „Gemini"-System) dar, die für den Einsatz im Gegentaktbetrieb (Push-Pull) gedacht sind und über einen gemeinsamen Source-Anschluss verfügen.

Gate und Drain sind getrennt – im Falle der Hilberling HPA-8000B werden diese beiden Systeme parallel geschaltet – wegen der schon erwähnt niedrigen Gate/Source-Kapazität ohne besondere Probleme. Zwei dieser Doppelsysteme kommen dann im Gegentaktbetrieb zum Einsatz.

Jeder LDMOS hat allein eine maximale Ausgangsleistung von 1,2 kW, sodass die Auslegung der PA für 1 kW eher konservativ ist und hoher Linearität zugute kommt.

Nochmals zu den grundsätzlichen und hier vereinfacht dargestellten Impedanzverhältnissen am Ausgang einer derartigen PA: Bei 50 V Drainspannung im Gegentaktbetrieb ist „pro Seite" (bei Gegentaktbetrieb arbeiten zwei gegenphasige Verstärkerzüge) mit ca. 3 Ω Quellwiderstand zu rechnen – die in der Reihenschaltung beider Züge knapp 6 Ω ergeben und sich deutlich einfacher zu 50 Ω transformieren lassen (1:9).

Der Aufwärtstransformation folgt anschließend ein Balun, der als Guanella ausgeführt ist, sodass die Ausgangsleistung unsymmetrisch in das kombinierte Tiefpassfilter/Anpassnetzwerk eingespeist werden kann.

Blockschaltbild HPA-8000B

Bild 2 zeigt das Konzept der PA auf Blockschaltbildebene. **Bild 3** gibt einen Eindruck über die klar gegliederten Baugruppen. Der gesamte Betriebsablauf der Endstufe wird durch einen zentralen Mikroprozessor (im weiteren CPU genannt) gesteuert. Hier werden alle wesentlichen Parameter wie Temperaturen, Spannungen, Ströme und Eingangs- wie Ausgangsleistungen überwacht, um ggf. Schutzschaltungen zu aktivieren.

Verfolgt man den HF-Pfad, ist sofort auffällig, dass im Eingangsteil ein Vorverstärker mit 23 dB Verstärkung und 10 dB Abschwächer alternativ ausgewählt werden können, sodass der Verstärkungsbereich in drei Stufen schaltbar ist und nominell von ca. 14 dB bis 47 dB reicht. Damit ist auch bereits eine Besonderheit der PA beschrieben, die den zahlreichen Nutzern mit Selbstbautransceivern entgegenkommt. Insbesondere SDR-Systeme mit Leistungen um 100 mW sind weit verbreitet. Die Ansteuerleistung kann in den Stufen 100 mW, 5 W und 50 W gewählt werden. Im Eingangsteil der PA wird

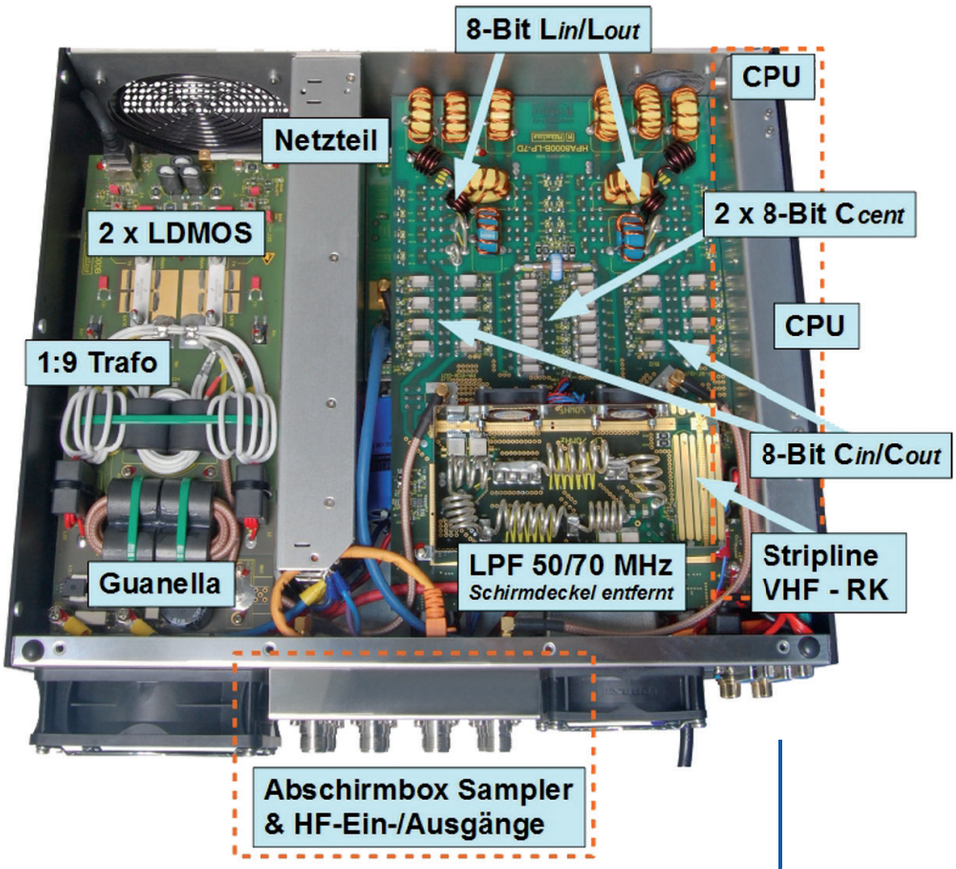

Bild 3: Die Baugruppen der Endstufe sind gut zu erkennen. Das eigentliche HF-Modul nimmt noch den kleinsten Raum ein. Unter der Filter/ATU-Platine befindet sich ein weiteres Netzteil und die Treiberplatine

die Steuerleistung gemessen. Über den Mikroprozessor (CPU) wird so ggf. die Abschaltung der PA bei Übersteuerung gewährleistet – sodass auch die Treiberstufe geschützt ist.

Messungen zeigen **(Bild 4)**, dass auf allen Bändern die Aussteuerung der PA für 750 W bereits mit weniger als 10 mW bzw. 5 W und 50 W erreicht wird.

Deshalb kann die Endstufe z.B. von der FLEX-6000 Baureihe direkt aus dem XVTR-Ausgang angesteuert werden – hier liegen bis zu +10 dBm = 10 mW an [6].

Steuerleistung für 750 Watt

Band	Verstärkungsstufe		
	100mW (20 dBm)	5 Watt (37 dBm)	50 Watt (47 dBm)
1,8 MHz	9 mW (9,6 dBm)	1,0 W (30,0 dBm)	12 W (40,8 dBm)
3,7 MHz	8 mW (9,2 dBm)	1,5 W (31,8 dBm)	15 W (41,8 dBm)
7,1 MHz	9 mW (9,6 dBm)	2,3 W (33,6 dBm)	17 W (42,3 dBm)
10,1 MHz	7 mW (8,4 dBm)	1,2 W (30,4 dBm)	9 W (39,5 dBm)
14,2 MHz	10 mW (10,0 dBm)	1,7 W (32,3 dBm)	13 W (41,1 dBm)
18,1 MHz	7 mW (8,4 dBm)	3,1 W (34,9 dBm)	17 W (42,3 dBm)
21,3 MHz	7 mW (8,4 dBm)	1,4 W (31,5 dBm)	9 W (39,5 dBm)
24,9 MHz	7 mW (8,4 dBm)	0,8 W (29,0 dBm)	6 W (37,8 dbm)
28,5 MHz	8 mW (9,2 dBm)	1,3 W (31,1 dBm)	7 W (38,5 dBm)
50,1 MHz	10 mW (10,0 dBm)	4,0 W (36,0 dBm)	25 W (44,0 dBm)
70,1 MHz	10 mW (10,0 dBm)	4,5 W (36,5 dBm)	33 W (45,2 dBm)

Bild 4: Die Ansteuerleistung der PA ist in drei Bereichen wählbar. Die hohe Verstärkung erlaubt auch dem Selbstbauer diverse Nutzungsmöglichkeiten. Die in den USA bestehende Beschränkung der Gesamtverstärkung einer PA von 15 dB ist einer der Gründe, warum die HPA-8000B dort nicht angeboten wird

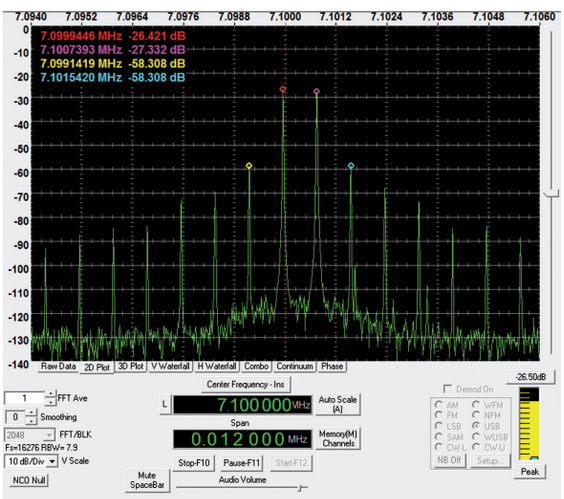

Bild 5: Die Prospektangaben der Fa. Hilberling zum IMA3 konnten insgesamt bestätigt werden. Hier eine zusätzliche Messung auf 7 MHz mit 1000 W PEP und einem IMA3 von 31,9 bzw. 31,0 dBc. Verständlicherweise deklarieren Hersteller den IMA in (dBpep) – dies ergibt rechnerisch einen um 6 dB höheren Wert für den IMA. Der Verfasser zieht die Angabe in (dBc) vor – der Wert, der direkt bei der Messung ablesbar ist

Die Kühlung – zentrales Problem einer PA

Die Frage ist heute nicht mehr, ob man mit Leistungshalbleitern hohe Leistungen verwirklichen kann – sondern eher, ob man in der Lage ist, die auf nur 1 cm² konzentrierte Verlustleistung „loszuwerden", d.h. auf einen großflächigen Kühlkörper überzuleiten und dort abzuführen.

Obwohl bei diesen LDMOS bereits Temperaturen am Montageflansch von bis zu 150 °C toleriert werden, findet die beworbene Toleranz der LDMOS gegenüber hohem SWR am Ausgang genau hier seine Grenzen. Die Temperaturen im Chip (sog. Junction Temp.) darf nach Datenblättern sogar bis zu 225 °C erreichen.

Entscheidend ist damit der Wärmeübergangswiderstand zwischen Montagefläche und Kühlkörper, der mit günstigen 0,10 K/W angenommen werden kann. Bei einer Verlustleistung von z.B. 500 W bedeutet dies eine Temperaturdifferenz von 50 °C zwischen Kühlkörper und Montageflansch.

Die Ableitung der Verlustwärme erfolgt bei der HPA-8000B nach erprobtem Muster: Ableitung der Wärme vom LDMOS auf eine Kupferplatte ausreichender Stärke und Überleitung auf einen Kühlkörper, der mit Luft durchströmt wird. Zur Sicherstellung eines niedrigen Wärmeüberleitwiderstandes von LDMOS-Chip zu Kupferplatte wird das Halbleitergehäuse auf die Kupferplatte gelötet. LDMOS, die ihr Source Substrat direkt auf ein verzinntes Metallplättchen nach außen führen, gewährleisten einen besonders (Wärme-) widerstandsarmen Kontakt zur Kupferplatte.

Die Zeiten, in denen PA-Halbleiter vom Nutzer getauscht werden konnten, sind vorüber – sie finden allein hier ihre praktischen Grenzen, ganz abgesehen davon, dass die mit der Betriebssoftware festgelegte Ruhestromeinstellung ebenfalls nicht zugänglich ist.

Ruhestrom- und Betriebsspannungseinstellung

Die wichtigste Stellschraube für die Herstellung der Linearität einer PA ist die Ruhestromeinstellung – allerdings ist dies in der modernen Halbleitertechnik optimal nicht mehr durch ein simples Potenziometer zu garantieren. Bei der HPA-8000B sorgt die CPU dafür, dass für die LDMOS in der Leistungsstufe in Abhängigkeit von der Betriebsfrequenz der günstigste Ruhestrom eingestellt wird. Dies gilt auch für die Treiberstufe, die durch ihren A-Betrieb ohnehin schon deutlich linearer arbeitet.

Hier wird in Abhängigkeit von der Arbeitsfrequenz neben dem Ruhestrom auch die Drain-Spannung variiert. Ein besonders hoher Intermodulationsabstand ist für die Treiberstufe notwendig, da bei der Kaskadierung von Verstärkerstufen die Treiber ein wesentlich besseres Intermodulationsverhalten aufweisen müssen, um die Linearität der Gesamtanordnung aus Treiber- und Endstufe nicht signifikant zu verschlechtern. Näheres dazu weiter unten.

Die erzielten Intermodulationsabstände sind respektabel und das Ergebnis der mit der Arbeitsfrequenz veränderten Betriebsparameter für Drain-Strom und -Spannung an Treiber und PA sowie der Suche nach einem optimalen Kompromiss bei der Auslegung der Tiefpassfilter. Die Fa. Hilberling GmbH gibt in ihrem Verkaufsprospekt vier Werte für den Intermodulationsabstand 3. Ordnung (IMA3) an.

Eine derart detaillierte Dokumentation der Leistungsmerkmale ist keine Selbstverständlichkeit. Bei Verwendung des PT-8000A als Steuersender konnten sie durch eigene Messungen bestätigt werden **(Bild 5)**. Ebenfalls von Interesse ist die Oberwellenunterdrückung, die Teil der CE-Konformität ist. Unterhalb einer Betriebsfrequenz von 30 MHz sind –50 dBc vorzuweisen. Oberhalb von 30 MHz sind es –70 dBc [7]. Exemplarische Messungen auf 14 MHz, 28 MHz und 70 MHz ergaben auch hier keine Auffälligkeiten **(Bild 6)**.

Neu: LPF mit integrierter ATU

Für die gute Linearität der HPA-8000B ist auch die Filteranordnung am Ausgang der PA entscheidend. Zunächst einmal sei in Erinnerung gerufen, dass keine Leistungsendstufe am Ausgang über einen weiten Leistungs- und Frequenzbereich konstante Impedanzverhältnisse aufweist. Der Entwickler sucht hier ständig nach einem Kompromiss zwischen Intermodulationsabstand (IMA), Wirkungsgrad der PA und ausreichender Oberwellenunterdrückung.

Ist der Kompromiss auf dem jeweiligen Amateurfunkband gefunden, kann eine Fehlanpassung der Antenne diese Bemühungen obsolet machen – deshalb werden derartige Leistungsendstufen oft in Verbindung mit Antennentunern (besser Antennenkopplern) verwandt.

Immer wieder trifft man auf den Irrtum, dass mit derartigen Kopplern die Antenne angepasst wird – es geht hingegen ausschließlich darum, der PA einen realen Abschlusswiderstand anzubieten, um die volle Leistung bei optimaler Qualität auszukoppeln. An der Antenne ändert sich mit derartigen Kopplern nichts …

Die HPA-8000B geht mit ihrem Ausgangsnetzwerk für die Kurzwellenbänder bis 28 MHz neue Wege. Ein CLC-Antennenkoppler ist mit dem CLC-Tiefpassfilter zur Oberwellenunterdrückung am Endstufenausgang integriert **(Bild 7)**. Hans Hilberling hat die üblicherweise verwendeten Tiefpassfilter (Low Pass Filter – LPF) 5. Ordnung in zwei LC-Glieder aufgeteilt. Die mittlere Kapazität (Ccent) eines LPF 5. Ordnung wurde dabei hälftig aufgeteilt – hier werden 25 Ω in beiden Richtungen „gesehen“. Die zwei seriellen Induktivitäten oder Filterhälften werden über eine Messbrücke miteinander verbunden.

Mit dieser Messbrücke können nun, „nach links“ in die PA schauend, die Impedanzverhältnisse ermittelt werden, um festzustellen, welche LC-Kombination (Lin und Cin) optimale Anpassung und Oberwellenunterdrückung gewährleistet. Gleichzeitig wird „nach rechts“ zum Antennenausgang gemessen und festgestellt, welche Fehlanpassung abweichend von 50 Ω real am Ausgang vorliegt.

In einem iterativen Prozess, d.h. in mehreren Schritten mit stetig steigender Verbesserung der Anpassung [8] werden anschließend die induktiven- bzw. kapazitiven Blindanteile (Lout und Cout) kompensiert. Die LPF bzw. die ATU-Elemente liegen jeweils 8 Bit abgestuft vor. Der LPF-Teil am Endstufenausgang ist für den Nutzer nicht zugänglich – die Einstellungen sind in der Firmware pro Band zum Teil in Subbändern unterteilt abgelegt.

Für 50 und 70 MHz treten konventionelle Tiefpassfilter 7. Ordnung an die Stelle der LPF/ATU-Kombination. Sie tragen dafür Sorge, dass die geforderten –70 dBc Unterdrückung der Harmonischen erreicht werden. Auf diesen Bändern steht deshalb keine ATU zur Verfügung.

(wird fortgesetzt) CQ DL

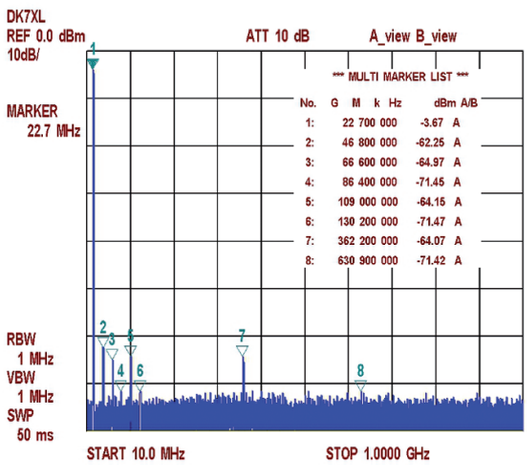

Bild 6: Oberwellenunterdrückung. Harmonische/Nebenwellen exemplarisch gemessen für 21 MHz bei 750 Watt bis 1 GHz

Literatur und Bezugsquellen

- [1] Siehe Artikelreihe zum PT-8000A, Klaus Lohmann, DK7XL, in: CQ DL 4/07; 5/07 und 6/07
- [2] Siehe Internetauftritt der Fa. Hilberling: www.hilberling.de
- [3] Siehe: www.ampleon.com und www.nxp.com
- [4] Siehe: http://cache.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MRFE6VP61K25H.pdf
- [5] Siehe: www.flexradio.com/amateur-products/powergenius-xl
- [6] Siehe Artikelreihe zur FLEX-6000 Baureihe, Klaus Lohmann, DK7XL, in: CQ DL 3/15; 5/15; 6/15; 7/15; 8/15 und 7/16
- [7] Siehe ETSI EN 301 783 V2.1.1 (2016-01)
- [8] Die Abstimmung eines LC-Kopplers muss nicht zwangsläufig iterativ erfolgen. Siehe hierzu Charles R. MacCluer „How to Tune an L-network Matchbox“ in: QEX November/December 2016

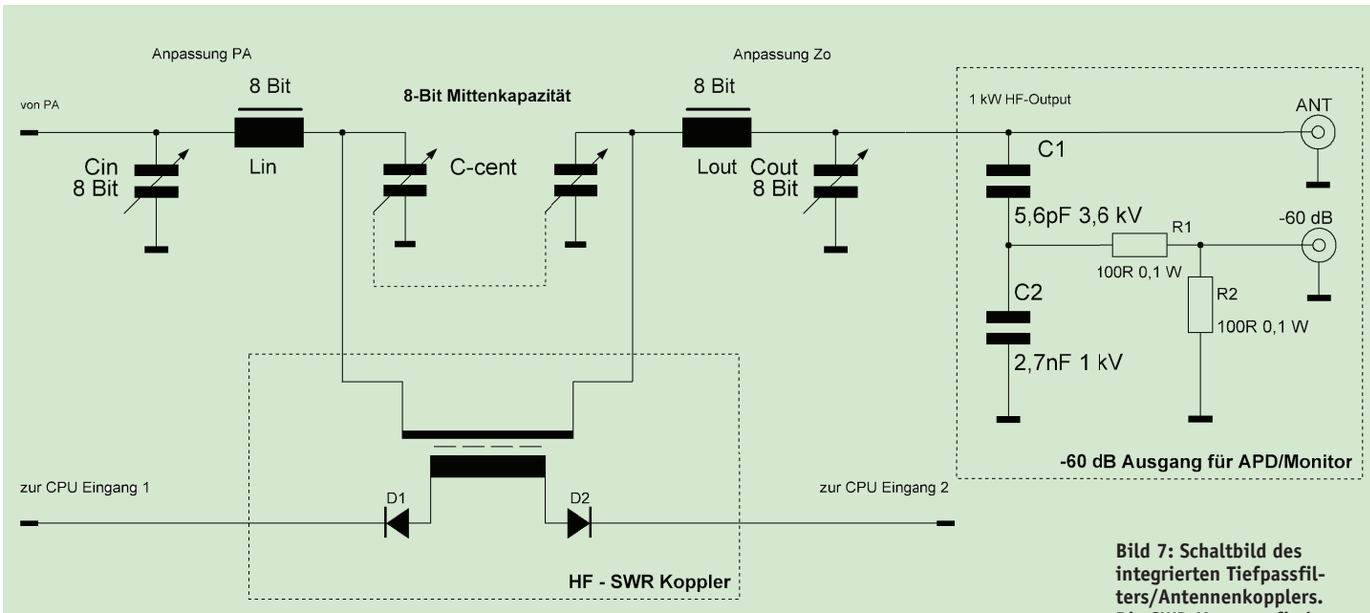

Bild 7: Schaltbild des integrierten Tiefpassfilters/Antennenkopplers. Die SWR-Messung findet natürlich an der Nahtstelle PA-LPF und ATU statt. Hinter der ATU liegt der –60 dB-Ausgang, auf den in Teil 2 eingegangen wird