

Magazin für Amateurfunk Elektronik · Funktechnik

1273 DXpedition nach Burundi:
Bangen und Hoffen

1278 QSLs - Wege zum Erfolg

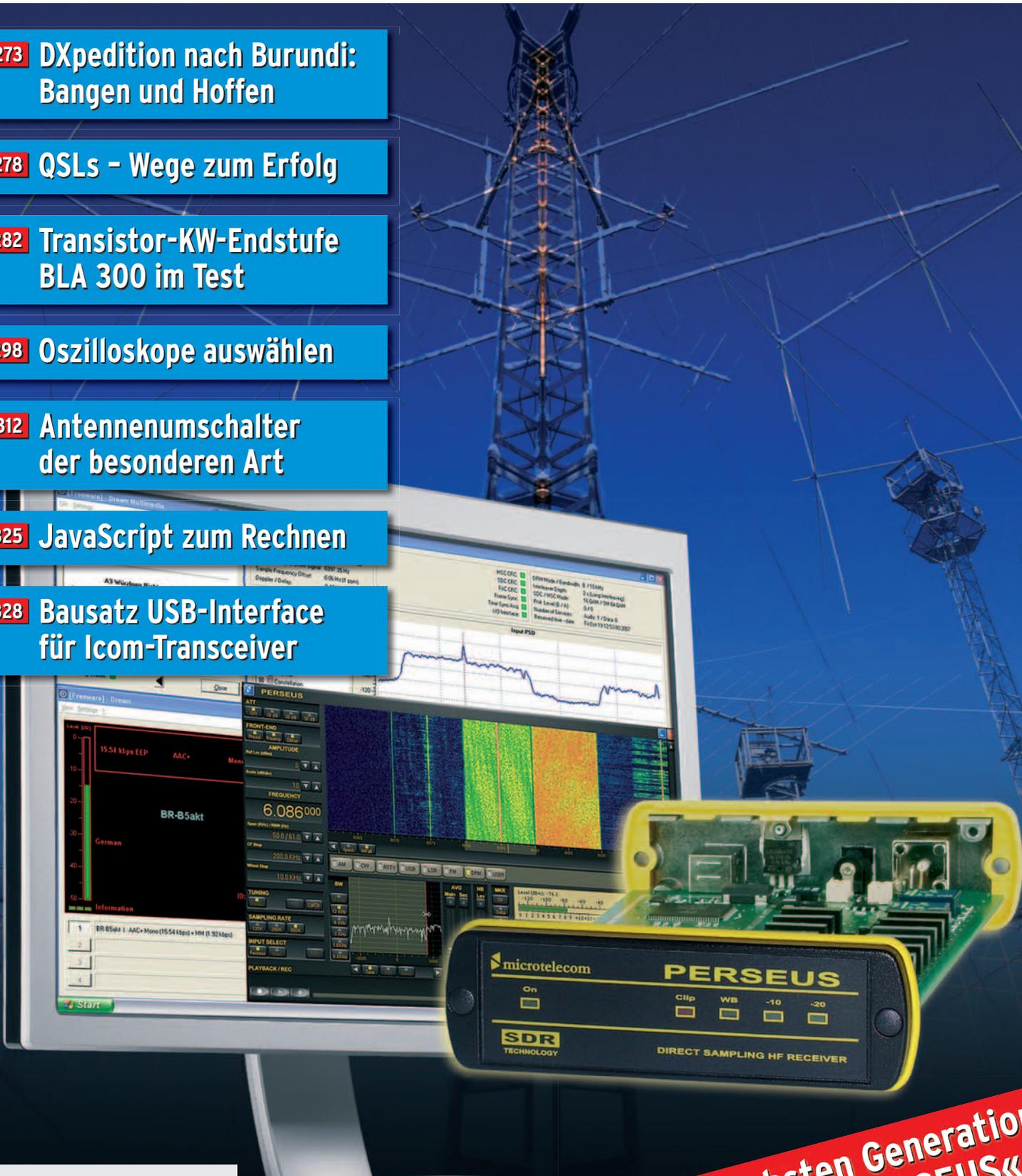
1282 Transistor-KW-Endstufe
BLA 300 im Test

1298 Oszilloskope auswählen

1312 Antennenumschalter
der besonderen Art

1325 JavaScript zum Rechnen

1328 Bausatz USB-Interface
für Icom-Transceiver



**SDR der nächsten Generation
Der »PERSEUS«**



1 2

4 194040 003506

SDR der nächsten Generation: der PERSEUS von Nico Palermo

CLEMENS SEIDENBERG

Die bisherigen softwaredefinierten Radios im Hobby-Bereich besitzen noch ein klassisches analoges HF-Frontend. Die softwaregebundene Signalverarbeitung erfolgt erst in einer nachgeordneten Stufe. Anders beim neuen KW-Empfänger PERSEUS: Hier beginnt die Digitalisierung bereits direkt hinter dem Antenneneingang, was ganz neue Perspektiven eröffnet.

Was sich seither softwaredefiniertes Radio (SDR) nannte, war eher ein Hybrid-Radio, eine Mischform aus analoger RF-Empfängerschaltung und digitaler Signalverarbeitung. Aus konstruktiven und Kostengründen wird meist eine niedrige – im Audiobereich liegende – ZF (häufig 12 kHz) er-

passung der Empfangsparameter. Viele von der fesselnden Hardwarebindung gelöste Prozesse lassen sich schnell und flexibel rein in der Software fortentwickeln. Der Traum vom idealen SDR bleibt jedoch die Digitalisierung unmittelbar „hinter“ der Antennenbuchse.



Bild 1:
Hightech nüchtern
verpackt:
PERSEUS-SDR

zeugt, die von der Soundkarte digitalisiert werden kann [1], [2]. Die erreichbare Bandbreite ist durch die Abtastrate der Analog-Digital-Wandlung in der Soundkarte entscheidend limitiert. Ein analoges HF-Frontend ist erforderlich, um die HF für die digitale Filterung und Demodulation zugänglich zu machen.

Das SDR-Prinzip bietet unübersehbare Vorteile und hat die Handhabung des Radios grundlegend verändert. Das integrale Echtzeit-Spektrogramm ermöglicht eine visuell unterstützte Abstimmung und An-

Leider steht dem Ideal die raue physikalische Wirklichkeit in Form des Abtasttheorems und der hohen Dynamik der Radio-Signale gegenüber. Ersteres verlangt, um ein unverfälschtes Bild der Informationen nach der Digitalisierung zu erhalten, eine Abtastfrequenz, die die höchste im Signal vorkommende Frequenz um mindestens das Doppelte übersteigt. Das entspricht für die Kurzwelle 60 MS/s (60 Millionen Abtastungen pro Sekunde). Letztere kann die Linearität des Prozesses beeinträchtigen: Die gesamte Spanne der Eingangssignale

zwischen sehr schwach und sehr stark muss sich ohne Verzerrungen – linear – in der digitalisierten Probe wiederfinden. Glücklicherweise gibt es ja noch Moores Gesetz. Es verspricht – durchaus nicht linear – eine Verdopplung der Chip-Komplexität zu gleichen Kosten alle zwei Jahre [3]. Offensichtlich gilt es auch für Umsetzer-Chips (ADC) und hat für bezahlbare ADCs mit ausreichender Leistung gesorgt, die einen Generationswechsel bei den softwaredefinierten Radios ermöglichten. PERSEUS macht davon Gebrauch und gehört neben den Geräten von RFSpace [4] zu den ersten Vertretern der neuen Epoche.

Wandler zwischen den Welten

Zurückhaltend leise im grauen Gehäuse und ohne Lüftergeräusch präsentiert sich der neuzeitliche PERSEUS [5], [6] – *Piccolo Eccellente Ricevitore per Segnali Elaborati Universalmente dal Software*, d.h. soviel wie kleiner exzellenter Empfänger mit universeller, softwaregestützter Signalverarbeitung. Im Inneren des von Nico Palermo, IV3NWV, entwickelten Gerätes erinnern nur der schaltbare Abschwächer, mit beruhigend klickenden Relais, und die zehn mitlaufenden Bandpässe noch an den herkömmlichen Empfängerbau.

Zur Bändigung des oft wild wuchernden Signal-Dschungels zwischen VLF und HF sind sie noch unverzichtbar. Sie decken das gesamte Empfangsspektrum zwischen 10 kHz und 30 MHz ab. Höhere Frequenzen hält ein Tiefpass vom Wandler fern. Hinter einem hochlinearen Vorverstärker liegt schon die Schnittstelle zwischen klassischer analoger und digitaler Welt. Zwischen ihnen vermittelt ein winziger LTC 2206-14-Analog-Digital-Umsetzer und zwar 80 Millionen mal pro Sekunde (80 MS/s) mit einer Auflösung von 14 Bit (entsprechend: 76 dB bei 40 MHz Bandbreite).

Auf dem Chip integriert ist eine per Software aktivierbare *Dither*-Schaltung, die wandlertypische Nicht-Linearitäten redu-

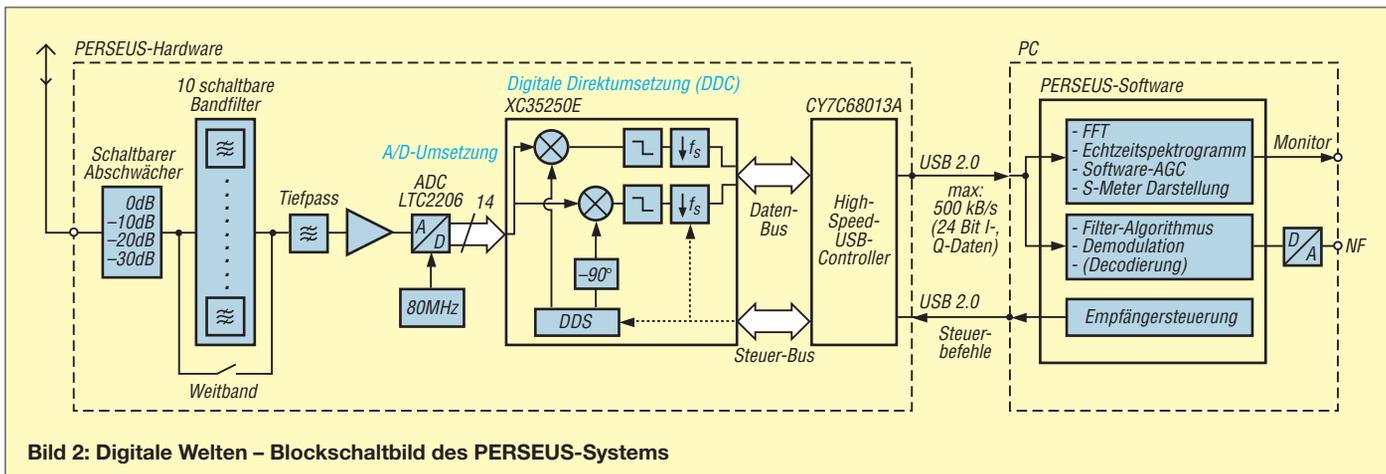


Bild 2: Digitale Welten – Blockschaubild des PERSEUS-Systems

ziert und den nutzbaren (nebenwellenfreien) Dynamikbereich (*SFDR*) des Umsetzers verbessert. Jetzt bereits liegt das Antennensignal in numerischer Form zur digitalen Weiterverarbeitung vor. So werden *Überlagerungsempfänger* und *Zwischenfrequenz* zu Begriffen einer aussterbenden Zeit des Radiobaus, überflüssig zur Beschreibung der aktuellen Architektur.

auftretenden negativen Frequenzen ermöglicht. Das Verfahren gestattet prinzipiell eine ausgezeichnete Spiegelfrequenzunterdrückung [2], [8]. Für die technische Realisierung der gleichförmigen, aber rechenintensiven Aufgaben ist die Flexibilität eines Digitalen Signalprozessors (*DSP*) nicht unbedingt erforderlich. Moderne *FPGAs* (*Field Programmable Gate Array*) mit ihrer entwicklerseitig rekonfigurier-

Flaschenhals des Informationsflusses, sondern die Leistungsfähigkeit des PCs und seiner Schnittstellen. PERSEUS liefert in freiwilliger Selbstbeschränkung maximal 500 KS/s in 24-Bit-Tiefe als I-, Q-Datenpaar. Die Spezifikation *High Speed* (480 Mbit/s) des USB 2.0-Protokolls muss erfüllt sein und es sollte sich idealerweise mindestens eine 1,5-GHz-CPU mit 1 GB RAM um die Datenflut kümmern – dann klappt auch mit dem SDR-Nachbarn.



Bild 3: Sonntagmorgen in DL; das Panorama-Spektrogramm zeigt reichlich schmalbandigen Betrieb auf 40 m.

■ **Oberflächenbehandlung**

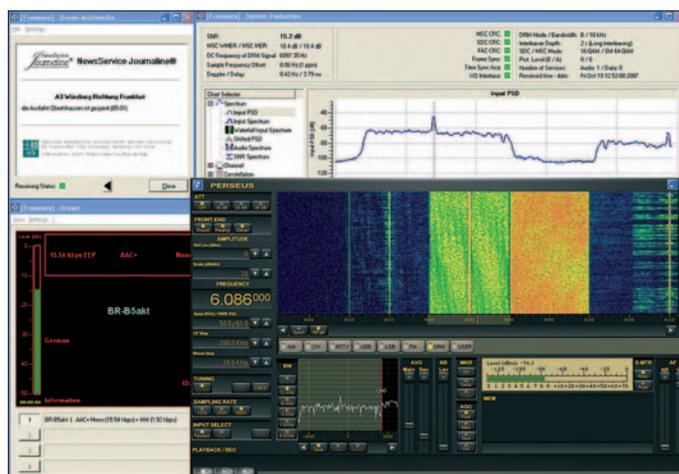
In ähnlicher Farbgebung wie das Gerät zeigt das Programmfenster ansprechendes Design in der zentralen Funktion als

Auf die Analog-Saurier folgt in der Radio-Evolution das Digital-Säugetier mit dem Namen *Digitale Direktumsetzung* (*direct digital conversion*, DDC) – leistungsstark und energiehungrig. Denn es gilt, den vom Umsetzer gelieferten opulenten Gigabit-Datenstrom in verdauliche Informationspaketen zu zerlegen [5].

Die DDC übernimmt die parametrierbare Auswahl des interessierenden Frequenzbereiches (Kanals) und seine Umsetzung in das Basisband – ein um 0 Hz zentriertes, trägerloses Signal (*Zero IF*). Gleichzeitig ist die bandbreitengerechte Anpassung (Dezimierung) der Abtastrate zu bewerkstelligen. Leistungsfähige Tiefpässe müssen dabei für die Einhaltung der Bedingungen des Abtasttheorems sorgen, um Verzerrungen zu vermeiden [5].

Zur Erzeugung des Basisbandes wird die Quadraturmischung eingesetzt, da nur die komplexwertige Repräsentation des Signals dessen korrekte Interpretation bei den

Bild 4: DRM-Empfang PERSEUS mit DReaM



baren Logik sind eine geeignete Hardware-Plattform.

Deren Hersteller, wie im vorliegenden Fall Xilinx, halten in Erwartung eines wachsenden Marktes fix und fertig implementierbare DDC-Module bereit. Das ins Basisband umgesetzte komplexwertige Nutzsinal wird über die USB-Schnittstelle in den Rechner transferiert. Dort erfolgt die abschließende Signalverarbeitung und Demodulation als auch die Visualisierung im Echtzeit-Spektrogramm.

Interessanterweise ist derzeit nicht mehr der Radio-Teil im Gesamtsystem SDR der

Schnittstelle zum Benutzer. Es ist klar gegliedert und, da man der Versuchung widerstanden hat, unzählige Features zu integrieren, übersichtlich und bequem zu bedienen. Die Haupt-Attraktion ist das Echtzeit-Spektrogramm, das maximal einen bis 400 kHz breiten Frequenzbereich überstreicht und so das Radio zum Breitwand-Fernseher macht. Jeder Bandbereich – egal ob Rundfunk- oder selbst das ausgedehnte 20-m-Amateurfunkband – ist komplett zu überblicken.

Neben dem klassischen Spektrogramm zeigt die alternative Wasserfalldarstellung nicht nur wo gesendet wird, sondern mit etwas Erfahrung auch in welcher Betriebsart. So verrät die sichtbare breite digitale „Spur“ eine noch nicht verzeichnete DRM-Ausstrahlung von Radio France International in Richtung Peking.

Für den ambitionierten Funkamateurliebt die vollständige Darstellung der Bandaktivitäten ein Wettbewerbsvorteil. Gewöhnungsbedürftig ist zunächst, dass selbst breitbandige Rundfunk-AM-Sendungen im 400-kHz-Fenster überraschend schlank erscheinen. Die abgebildete Bandbreite lässt sich jedoch stufenweise verschmälern, wobei die Frequenzauflösung steigt, die FFT- und Wasserfallgeschwindigkeit aber deutlich abnimmt.

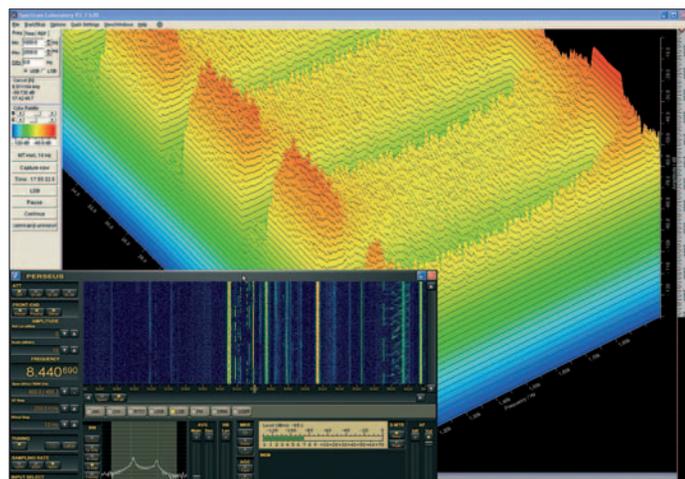


Bild 5: Teamwork mit ergänzender Software: 3D-Spektrum eines RTTY-Signals durch Spectrum Lab

Das Programmfenster selbst ist in seiner Größe oder Auflösung nicht skalier- oder zoombar. Quasi als Vergrößerungsglas steht jedoch ein zweites Spektrogramm zur Verfügung. Passend zur aktuellen Betriebsart zeigt es einen 0,8 bis 12 kHz breiten Frequenzabschnitt um das selektierte Signal. Mit dieser optischen Einstellungshilfe gelingt die präzise Filtereinstellung zur Isolierung eines Signals von umgebenden Störungen spielend.

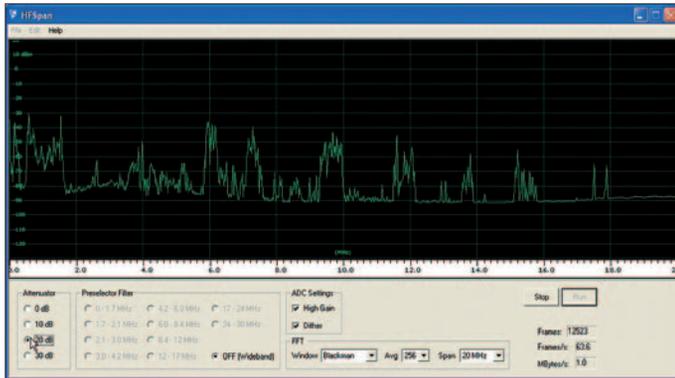


Bild 6:
HF-Span zeigt das komplette Spektrum

Die gängigen Demodulatoren sind im Programm bereits integriert. Allerdings stand nur eine Vorabversion 0.9 mit eher rudimentärem Funktionsumfang zur Verfügung, die unter Windows XP einen recht stabilen Eindruck hinterließ. Für den Verkaufstart soll dann eine Vollversion einschließlich der üblichen Speicher- und Verwaltungsoptionen bereitstehen.

Ein Aufzeichnen der Rohdaten zur zeitversetzten und wiederholten Analyse eines abgetasteten Frequenzbandes wird möglich sein, wobei eine Datenrate, die das MPEG-2 (Main Level) Niveau übersteigt, bewältigt werden muss. Versprochen für die weitere Zukunft sind unentgeltliche Updates.

■ **Radio-Breitwandkino**

Selbst in den unteren Frequenzregionen verliert der Empfänger nicht wesentlich an Empfindlichkeit, wovon man sich beim Empfang der europäischen VLF-Zeitzeichensender leicht überzeugen kann. Diese hohe Sensitivität setzt sich über das komplette Spektrum fort.

Spannend wird es bei den geschäftigen Amateur-, Utility- und BC-Bändern. Hier öffnet das Cinemascope-Wasserfalldiagramm einen faszinierenden Blick ins pralle elektromagnetische Leben eines ganzen Frequenzbereichs.

Ob es die Gelegenheit ist, gleich eine Vielzahl von CW-Stationen im wortwörtlichen Sinn direkt mitzulesen, den Zoo der vielfältigen Utility-Betriebsarten zu untersuchen oder sich an der ungebrochen hohen Zahl von Rundfunksendern und ihrer exakten Einreihung ins Frequenzraster zu erfreuen, ein erfrischender neuer Blick auf Gewohntes ist garantiert.

Selbst eine durchreisende Iono-Sonde bleibt ganze 4 s im Bild. Insgesamt eine neue Dimension des „Seh-Radios“. Dabei kommt insgesamt keine Hektik auf. Mit visuellem Tuning und chirurgischer Filterpräzision bleiben Gerät und Nutzer immer im linearen Bereich. Alle Demodulatoren klingen sehr angenehm und unaufgeregt. Die Selektivität, der in den Algorithmen der PC-Software realisierten digitalen verzerrungsfreien Filter ist ausgezeichnet.

Ihre Parameter sind aber vom Anwender ebenso wenig zu verändern wie die der AGC. Diese arbeitet softwarebasiert in Bezug auf das schmalbandige, aktuell selektierte Signal.

Ein Übersteuern (bei -6 dBm) zeigt der Empfänger selbst durch eine Clip-LED an. Die Aktivierung des Abschwächers ist bei

tallation einer Windows-typischen DLL erlaubt es gleichfalls die direkte Steuerung des Empfängers [9], [10]. Uneigennützig ist PERSEUS – nach Betätigung der Taste *User* – bereit, den nicht demodulierten „rohen“ Datenstrom an unabhängige Software weiterzugeben – vorausgesetzt die kann etwas mit einem Quadratursignal anfangen, wie etwa der Open-Source DRM-Decoder DReaM [11]. Eventuell muss man DReaM auf der Kommandozeile die richtigen Parameter übergeben.

So erschließt sich auch mit PERSEUS das immer noch recht spärliche Angebot des vermeintlich zukunftsreichen digitalen KW-Rundfunks. Hierzu ist die Installation einer „virtuellen“, also softwaremäßig nachgebildeten Soundkarte zur Signalweitergabe erforderlich. Dem Vernehmen nach sollen die Endkunden *Virtual Audio Cable* als Zugabe erhalten [12]. Wobei es sich hoffentlich nicht um die kostenfreie Test-Version handelt, die durch ein ständig gesprochenes *Trial* nervt und somit eine auch nur probeweise Anwendung praktisch ausschließt.

Ohne Zusatzsoftware ist die demodulierte NF über die Soundkarte problemlos für weiterverarbeitende Softwaredecoder (Spektrumanalysator, PSK- bzw. SSTV-Decodierung usw.) erreichbar [13]. Ein Häkchen bei den Aufnahme-Einstellungen des Windows-Mixers in der Rubrik *Was Sie hö-*



Bild 7:
Viel zu sehen: Utility-Zoo mit durchreisender Iono-Sonde
Foto und Screenshots: Seidenberg

der wirksamen mitlaufenden Vorselektion und dem enormen Dynamikbereich (107 dB für CW bei 500 Hz Bandbreite) selbst an leistungsstarken Antennen kaum je erforderlich.

So bietet sich der Einsatz als Messempfänger an: Das mitgelieferte Programm *HF-Span* stellt hierzu das ganze abgetastete Spektrum von 0 bis 40 MHz dar. Die frequenzabhängigen Eigenschaften zweier Antennen lassen sich so auf einen Blick vergleichen oder die Ausbreitungsbedingungen im zeitlichen Verlauf verfolgen. Eine Alternative zur PERSEUS-Software ist das sicher vielen bekannte SDR-Programm *Winrad*, dessen Oberfläche allerdings etwas unaufgeräumt wirkt. Nach Ins-

ren genügt. Das Panorama-Wasserfallspektrogramm macht dann die Jagd nach einer bestimmten Betriebsart zum Vergnügen.

■ **Fazit**

Ähnlich wie der Sieg des mythologischen Perseus über die Gorgone Medusa [14] eröffnet sein elektronischer Urahn neue Perspektiven – nicht in der antiken Götterwelt, sondern als Vorreiter einer neuen Generation von Software-Radios mit digitaler Direkt-Umsetzung. Der interessierte Nutzer muss auch nicht wie der griechische Held sein Leben einsetzen, sondern kann nach Entrichtung eines vergleichsweise angemessenen Entgelts seinen Platz im Technologie-Himmel einnehmen. Die-

ser ermöglicht neue Analysemöglichkeiten und innovative Einsichten in schon vermeintlich Altbekanntes.

Voraussetzung ist allerdings ein leistungsfähiger Rechner. In der Bilanz nicht unerwähnt bleiben darf der damit verbundene weiter steigende Energiebedarf des Gesamtsystems. Der Ungläubige wird gar fragen, warum zum Radiohören ein PC mit der Leistungsaufnahme einer Rheumadecke nötig ist.

Das einstmals autonome Gerät Radio hat sich zum „PC-Sensor“ für Radiowellen entwickelt, was neue Perspektiven schafft – allerdings unter der Zurücklassung mancher positiver Eigenschaften [15]. Trotzdem: Das (energieoptimierte) Konzept Software-Radio gehört zu den Schlüsseltechnologien des Jahrzehnts.

Letzteres nicht unbedingt wegen seiner Anwendung im Amateurfunkbereich, sondern bei weltweit millionenfach verbreiteten tragbaren Transceivern, die gemeinhin als

Eckdaten des PERSEUS nach Herstellerangaben

Empfängerschaltung	Softwaredefinierter Empfänger mit Digitaler Direktumsetzung (DDC) bei 80 MHz Abtastfrequenz
Frequenzbereich	10 kHz bis 30 (40) MHz
Frequenzauflösung	1 Hz
Betriebsarten	AM, AMS, LSB, USB, CW, FM (softwareabhängig)
Spiegelfrequenzunterdrückung	90 dB @ 14,15 MHz
IP3	31 dBm @ 14,15 MHz
Dynamikumfang	103 dB @ 2,4 kHz SSB
Frequenzabweichung	±1,0 ppm (rekalibrierbar)
Empfindlichkeit	0,39 µV SSB (S+N)/N = 10 dB @ 14,15 dB
Analog-Digital-Umsetzer	LTC 2206-14 80 MS/s @ 14 Bit SFDR: 110 dB (bei aktiver Dither-Schaltung)
digitale Direktumsetzung DDC	XILINX Spartan III E FPGA
Schnittstelle	USB 2.0 (High Speed)
Ausgangs-Bandbreiten	100/200/400 kHz (mit -110 dB Alias-Unterdrückung)
Preis	799 €; Deutscher Distributor: SSB Electronic GmbH [6]

Handys bekannt sind. Multimodalität und Mehrkanalempfang sind die kommenden Herausforderungen. Aus dem Amateurfunkbereich wurde allerdings die Entwicklung von Anfang an konsequent vorangetrieben. Den von PERSEUS realisierten technischen Eckdaten dürfte die Bedeutung

als Quasi-Standards einer neuen Software-Radio-Generation zukommen.

Auf die weitere dadurch initiierte Softwareentwicklung darf man besonders gespannt sein. Sie wird neben dem Unterhaltungswert neuer Anwendungen auch die Zukunftsfähigkeit des Geräts durch entsprechende Aktualisierungen für lange Zeit gewährleisten. Auf der entsprechenden Webseite von SSB Electronic [6] gibt es verschiedene Hörproben zum Herunterladen. cusei@gmx.net

Digitale Direktumsetzung (DDC), Dynamik und Prozess-Gewinn

Ähnlich wie wir beim Sehen aus einem Datenstrom mit enormer Bandbreite nur den momentan wichtigen optischen Eindruck herausfiltern und wahrnehmen, isoliert die Direkte Digitalumsetzung (DDC) aus der Datenflut der gesamten abgetasteten Bandbreite den interessierenden Frequenzabschnitt zur intensiven weiteren Verarbeitung. Der im PERSEUS eingesetzte A/D-Umsetzer (engl. ADC) LTC2206 liefert bei einer Abtastfrequenz von $f_s = 80$ MS/s einen Datenstrom von 1,120 Gbit/s. Von seinem idealen möglichen Dynamikumfang von

$$20 \cdot \log(2^{14}) \approx 84,3 \text{ dB}$$

verbleibt real durch wandlertypische Unzulänglichkeiten („Rauschen“) noch ein Signal-Rausch-Verhältnis (SRV, engl. SNR) von 76 dB, was etwa 13 effektiv nutzbaren Bits (ENOB) entspricht. Das Grundrauschen (engl. Noise Floor) liegt bei -82 dBm (-76 dBFS). Das ist das Ausgangsmaterial für die DDC. Sie leistet:

- die komplexe Mischung des interessierenden Frequenzbandes auf eine „ZF“ von 0 Hz,
- die Reduktion der Abtastrate (Dezimation)
- und sehr willkommen: die Erhöhung des Rauschabstandes (Integration).

Die Erhöhung des Rauschabstandes (in Dezibel) berechnet sich als *Prozess-Gewinn* G_p infolge des Oversamplings aus dem Verhältnis der Abtastfrequenz f_s und der Bandbreite B zu:

$$G_p = 10 \cdot \log\left(\frac{f_s}{2 \cdot B}\right).$$

Im vorliegenden Fall führt das für eine SSB-Bandbreite von 2,4 kHz zu einer SRV-Verbesserung von 42 dB und zu einem gesamten Dynamikumfang von 118 dB. Der nutzbare Dynamikbereich eines Systems ist allerdings durch die Nichtlinearitäten der Schaltungsanteile – etwa des Vorverstärkers – begrenzt. An ihnen entstehen durch die Interaktion verschiedener (starker) Signale Intermodulationsprodukte, deren Frequenzen sich durch die Taylor-Reihe annähern lassen. Besonders unangenehm sind Intermodulationen der 3. Ordnung (IM3), da ihre Frequenzen in den Bereich des Nutzsignals fallen und eine Ausfilterung schwer fällt.

Die sinnvolle Angabe des Dynamikumfangs bezieht sich daher auf den frei von IM3-Produkten nutzbaren Dynamikbereich (engl. *Third-Order Dynamic Range, DR3*). Das Verhalten von Systemen mit rein analogen Komponenten ist diesbezüglich mit anerkannten Spezifikationen wie dem Interzept-Punkt 3. Grades (IP3) gut abzubilden. Für Systeme, in denen mittels ADC eine Digitalisierung stattfindet, erlaubt es keine so verlässliche Aussage über das Auftreten von Intermodulationen.

Insbesondere wirkt der ADC abrupt bei Erreichen seines Sättigungs-Pegels als idealer Begrenzer mit der Folge erheblicher Intermodulations-Verzerrungen. Auf den IM3-freien Dynamikumfang eines Direktmischempfängers hat das Verhalten des eingesetzten A/D-Umsetzers vorrangigen Einfluss, das wiederum mit der Konstellation der Eingangssignale variiert. Entsprechende Simulationsprogramme stellen alle Wandler-Hersteller bereit.

Für PERSEUS wird pauschal ein DR3 von 103 dB (bei 2,4 kHz Bandbreite) bestimmt. Die untere Grenze des nutzbaren Dynamikumfangs ist durch den Rauschpegel des Systems bestimmt. Ein im DDC des PERSEUS integrierter großer FIFO-Puffer erlaubt bei 80 MS/s die Darstellung einer 40 MHz umfassenden 8-K-FFT-Spektralanalyse mit einer Frequenzauflösung von $8 \cdot 10^7 / 2^{13} \approx 9,8$ kHz. Der gemessene Rauschpegel beträgt -118 dBm entsprechend -158 dBm/Hz. Das Rauschmaß beträgt $F = (-158 \text{ dB}) - (-174 \text{ dB}) = 16 \text{ dB}$. Es resultiert ein Wert von -124 dBm (0,14 µV an 50 Ohm) als kleinstes empfangbares Signal (engl. MDS) für SSB bei 2,4 kHz (34 dBHz) Bandbreite. Im Übrigen ist der letztlich an den PC übermittelte Datenstrom nach der Dezimation auf 24 Mbit/s geschrumpft.

Literatur und URLs

- [1] Meyer, M., HB9BGV: SDR-1000: Eine neue Ära im Amateurfunk ist eingeläutet! (1). FUNKAMATEUR 53 (2004) H. 5, S. 454–457
- [2] Raban, C., DM2CQL: I/Q-Minimalsystem für 80/40 m. FUNKAMATEUR 55 (2006) H. 9, S. 1040–1041
- [3] Moore, G. E.: Cramming more components onto integrated circuits. Electronics 38 (1965) H. 8
- [4] Scholz, B., DJ9CS: SDR-IQ – Spektrumanalyse und softwaredefinierter Empfänger. FUNKAMATEUR 56 (2007) H. 7, S. 721–723
- [5] Palermo, N., IV3NWW: Microtelecom s.r.l. – Pavia di Udine, Italien; www.microtelecom.it/perseus/index.htm
- [6] SSB Electronic GmbH, Handwerkerstr. 19, 58638 Iserlohn, Tel. (0 23 71) 95 90-0, Fax -20; speziell: www.ssb.de/amateur/products/perseus/perseus.shtml
- [7] HUNT Engineering (2007): Digital Down Conversion (DDC) Theory. www.hunt-dsp.com/info/ddctheory.htm
- [8] Seidenberg, C.: Erläuterungen zum Quadratur-signal. FUNKAMATEUR 54 (2005) H. 4, S. 344
- [9] di Bene, A., I2PHD: WinRad. <http://digilander.libero.it/i2phd/winrad/>
- [10] Seidenberg, C.: Winradio G315 mit Onboard-DSP und innovativen Software-Werkzeugen. FUNKAMATEUR 56 (2007) H. 11, S. 1172–1174
- [11] Open-Source DRM-Program DReaM: DReaM DRM Receiver, Open-Source Software Implementation of a DRM Receiver under GNU General Public License (GPL). <http://drm.sourceforge.net/>
- [12] Program Virtual Audio Cable; aktuelle Version: 4.08; Einzellizenz: 22,50 €; <http://nrcde.ru/music/software/eng/vac.html>
- [13] Bücher, W., DL4YHF: Spectrum Lab. www.qsl.net/dl4yh/spectra1.html
- [14] Der antike Held und Namensgeber für das Akronym PERSEUS: [http://de.wikipedia.org/wiki/PERSEUS_\(Mythologie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/PERSEUS_(Mythologie))
- [15] Siegismund, H., DL1XR: Audion mit Pfiff: Lambda-Einkreiser für Mittelwelle. FUNKAMATEUR 56 (2007) H. 11, S. 1180–1183