

Einfache SDR-Transceiver

Bodo Scholz, DJ9CS
dj9cs@darq.de

1. Einführung

Inzwischen kommt kein Funkamateurl mehr an dem Thema Software Defined Radio (SDR) vorbei. Schlägt man unsere Zeitschriften auf, so werden im Anzeigenteil die unterschiedlichsten Systeme unter dem Begriff SDR mit überzeugenden Spezifikationen angeboten. Die Mehrzahl sind Empfänger, aber inzwischen sind es auch komplette Transceiver wie der SDR-1000, FLEX-5000 oder ADAT-200A. Dies stellt keine vollständige Aufzählung dar. Es stehen sich zwei grundlegend unterschiedliche Konzepte gegenüber. Bei FlexRadio Systems werden die HF-Signale in das Basisband um Null Hz mit einem Quadrature Sampling Detector (QSD) umgesetzt. Dort werden die analogen I/Q-Signale digitalisiert und der digitalen Signalverarbeitung (DSP) zugeführt. In umgekehrter Reihenfolge werden die Sendesignale in der DSP erzeugt. Die digitalen I/Q-Signale werden dann nach der DA-Wandlung einem Quadrature Sampling Exciter (QSE) zugeführt und auf die eigentliche Sendefrequenz umgesetzt. Ich komme später auf diese Aufbereitung näher zurück.

Im zweiten Konzept werden Antennensignale z.B. bis 30 MHz direkt einem AD-Wandler zugeführt. Die Umsetzung ins Basisband erfolgt dann mit einem Digital Down Converter (DDC). Umgekehrt erfolgt die Erzeugung der HF direkt digital auf der Sendefrequenz und steht zur Verstärkung dann hinter einem DA-Wandler bereit. Ein Vertreter ist der Transceiver ADAT-200A von HB9CBU.

Ich bin hier nicht weiter auf notwendige Filter usw. eingegangen, ebenso möchte ich auch nicht die Konzepte gegeneinander bewerten. Beiden Konzepten gemeinsam sind die recht hohen Anschaffungskosten von >2000 €. Um dennoch viele Funkamateure zu geringsten Kosten an die SDR-Technologie heranzuführen, entstanden vor über drei Jahren die SoftRock-Projekte im Kreis der 'FlexRadio Friends'. In diesem Vortrag soll es nun um einfache preiswerte Empfänger und Sender nach diesem Konzept gehen.

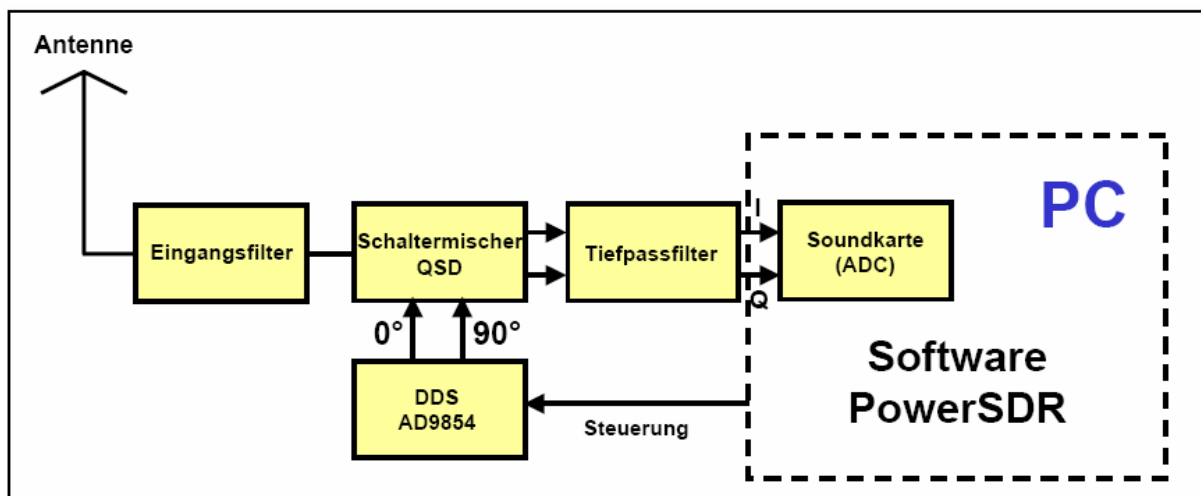


Bild 1: Prinzipieller Aufbau des SDR-1000 Empfängers

2. Das SoftRock-Konzept

Angeregt wurde alles durch die Artikel von Gerald Youngblood, K5SDR, in der amerikanischen Zeitschrift QEX, den SDR-1000, zunächst praktisch als Bausatz bestehend aus mehreren Platinen und der zugehörigen Software PowerSDR. Im Bild 1 ist der prinzipielle Aufbau des Empfängers des SDR-1000 dargestellt. Der Kern ist der Schaltermischer, der sogenannte 'Quadrature Sampling Detector' (QSD) nach Tayloe (Bild 2). Alle 90° der Mischfrequenz f_c wird das Antennensignal abgetastet. Da die Modulationsfrequenzen der HF-Signale von der Antenne viel geringer als die Abtastfrequenz sind, dürfen jeweils die Abtastwerte von 0° und 180° bzw. 90° und 270° vorzeichenrichtig zusammengefasst werden. Entsprechend der Abtastfrequenz f_{abt} der Soundkarte werden die Signale um die Frequenz $f_c \pm f_{abt}/2$ in das Basisband um $0 \text{ Hz} \pm f_{abt}/2$ umgesetzt. Es steht also eine Bandbreite von insgesamt f_{abt} zur weiteren digitalen Bearbeitung zur Verfügung. Das Samplingtheorem wird nicht verletzt, da zwei unabhängige orthogonale Zeitreihen analysiert werden.

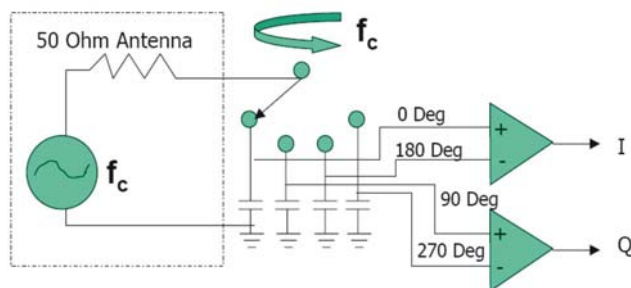


Bild 2: Der Tayloe Detektor

Beim SDR-1000 erfolgt die Abstimmung mit Hilfe des DDS AD9854. Um den bekannten unerwünschten (spurious) Signalen eines DDS Oszillators beim Mischvorgang weitestgehend auszuweichen, wird der DDS nur in groben Schritten durchgestimmt. Die Feinabstimmung erfolgt dann softwaremäßig. Hier setzt die Idee des SoftRocks an. Es wird auf den durchstimmbaren DDS verzichtet und stattdessen eine feste

Quarzfrequenz für f_c genutzt. Über die softwaremäßige Abstimmung steht nur in einem Band ein Bereich von der Breite f_{abt} zum Empfang bereit.

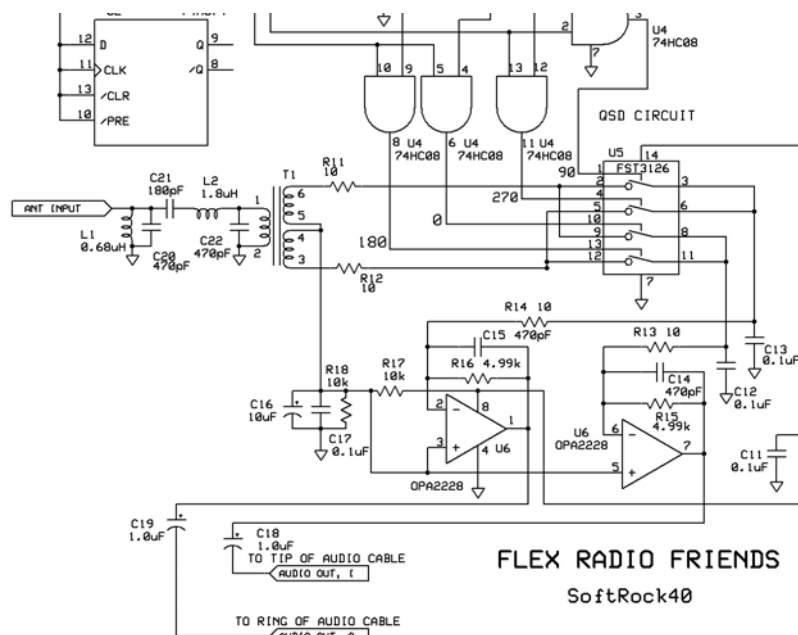


Bild 3: Schaltungsauszug eines der ersten SoftRock Empfänger

Das Programm PowerSDR wurde entsprechend um diese Möglichkeit erweitert. Über die softwaremäßige Abstimmung steht nur in einem Band ein Bereich von der Breite f_{abt} zum Empfang bereit. Das Programm PowerSDR wurde entsprechend um diese Möglichkeit erweitert. Damit war weltweit der Anstoß für viele ähnliche kleine Empfängerbaugruppen gegeben. Im Bild 3 ist der Kern eines der ersten SoftRock Empfänger wiedergegeben. Die Abtastsignale 0° , 90° , 180° und 270° werden von der vierfachen Mittenfrequenz abgeleitet. Diese steuern dann die Schalter im FST3126. Die nachfolgenden rauscharmen OPamps, als Tiefpass beschaltet, heben die Pegel passend zur Soundkarte an. Bild 4 zeigt einen solchen kompletten SoftRock Empfänger. Erwähnt werden muss hier Tony Parks, KB9YIG, der inzwischen einige tausend der SoftRock Kits zu fast Selbstkosten an die Funkamateure weltweit abgegeben hat. Neben den verschiedenen SoftRock Versionen werden in DL noch die bekannten Kits vom FUNKAMATEUR angeboten. Neben der ergänzten Software

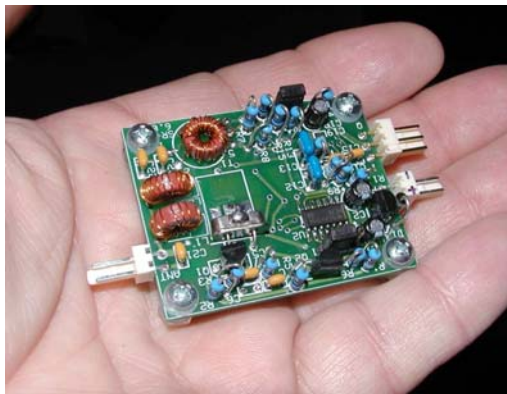


Bild 4: SoftRock Empfängers für 80m

PowerSDR gibt es noch weitere speziell für dieses Konzept entwickelte ebenfalls kostenfreie Programme:

- ROCKY von VE3NEA
- KGKSDR von M0KGGK

Diese Liste ist nicht vollständig. Es gibt inzwischen viele weitere, wie z.B. Winrad von I2PHD. Weiterführende Informationen stehen im Internet bereit.

3. Der Sender zum SoftRock-Konzept

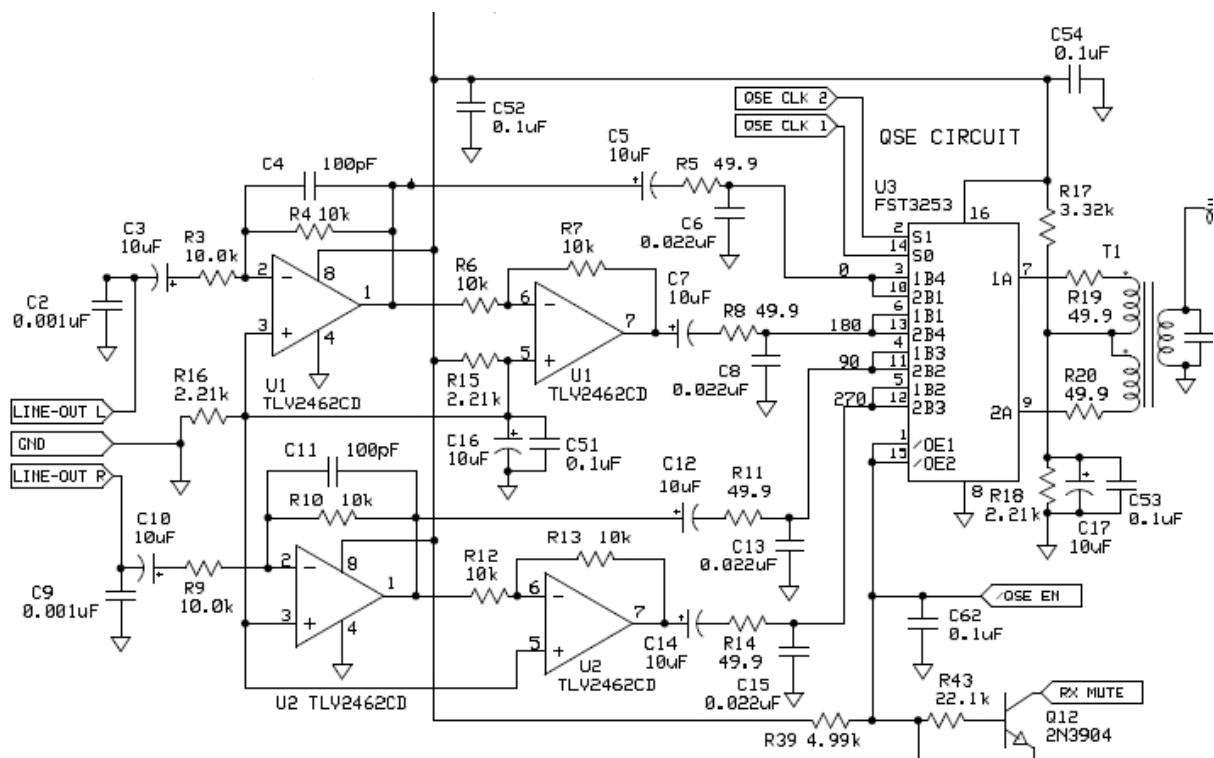


Bild 5: Quadrature Sampling Exciters (QSE) mit Ansteuerung im SoftRock RXTX

Nach dem großen Erfolg der kleinen Empfängermodule entstand schnell der Wunsch nach einer Ergänzung mit einem passenden Sendeteil. In Umkehrung des QSD im Empfänger entstand so die zugehörige Schaltung eines Quadrature Sampling Exciters (QSE). Im PC werden digital die I/Q-Signale errechnet. Dies können sinusförmige sein für CW oder auch solche, die aus einem digitalisierten Mikrofonsignal abgeleitet sind. So wie auf der Empfängerseite im ganzen Basisband um die Frequenzen $0 \text{ Hz} \pm f_{\text{abt}}/2$ abgestimmt wird, werden auf der Sendeseite die Signale entsprechend in diesem Bereich erzeugt. Nach der DA-Wandlung in der Soundkarte werden dann aus den beiden 90° phasenverschobenen Signalen mit den vier Operationsverstärkern (Verstärkung jeweils 1) die vier in den Phasenlagen 0° , 90° , 180° und 270° zur Ansteuerung des Schaltermischers FST3253 gewonnen. Die Schalter werden mit den f_c Takten aus dem Empfänger betrieben. Am Ausgang werden alle Signalkomponenten im Transformator T1 phasenrichtig zum eigentlichen Sendesignal zusammengefasst. In Abhängigkeit von der Phasenbeziehung zwischen den I- und Q-NF-Signalen entsteht so im Idealfall ein einziges sauberes HF-Signal bei der Frequenz f_c plus oder minus der NF Frequenz, also bei unterdrücktem Träger. Im Bild 6 ist dies im Detail dargestellt.

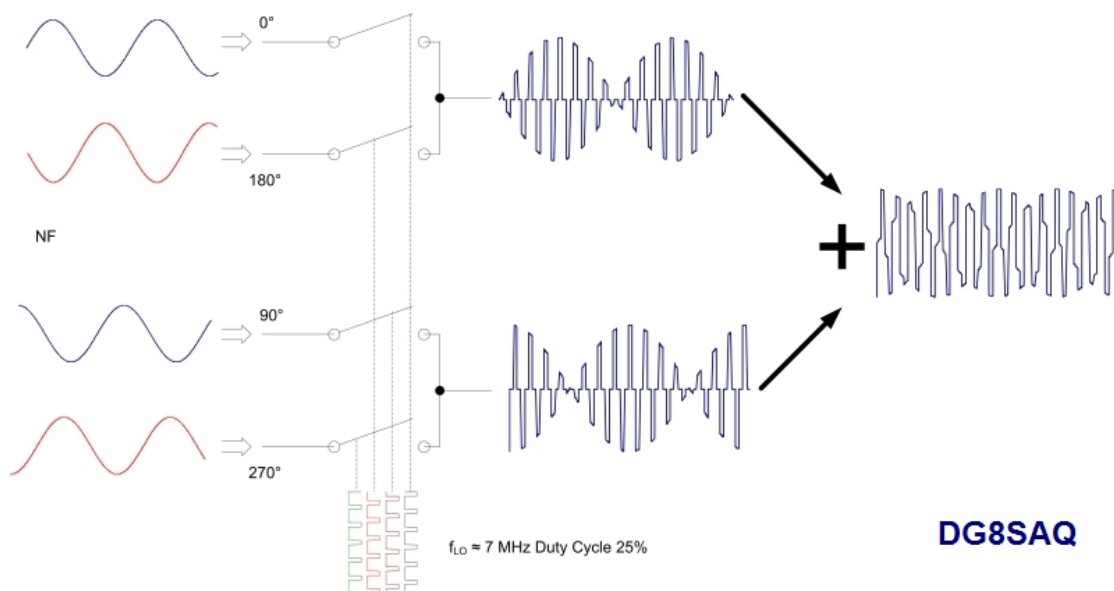


Bild 6: Funktion des Quadrature Sampling Exciters (QSE)

Die Programme PowerSDR (SoftRock-Version), ROCKY und KGKSDR sind inzwischen alle für den SDR-Transceiver Betrieb erweitert worden.

4. Komplette einfache SDR-Transceiver

Von Tony Parks, KB9YIG sind in einigen Entwicklungsstufen Transceiver nach oben beschriebem Prinzip entwickelt und angeboten worden. Die Bausätze der Versionen SoftRock RXTXv6.1 bzw. v6.2 hat Tony immer wieder neu auflegen müssen. Es sind alles Einband-Transceiver, die für alle Bänder von 160m bis 10m im Laufe weniger Monate zur Verfügung standen. Tony hat die Grundidee, mit preiswerten Bausätzen die Funkamateure an die SDR-Technologie heranzuführen, nie aus dem Auge verloren. So wurden durchweg preisgünstige Computerquarze für die Erzeugung der Mischfrequenzen eingesetzt. Dies gilt auch für die Obertonoszillatoren, die für die Bänder 20m bis 10m notwendig wurden. Zusammen mit einer kleinen PA wird auf einer Platine von nur ca. 6,5 cm x 9 cm eine Ausgangsleistung von etwa 1 Watt er-

zeugt. Erreicht wird dies in einem kompakten Aufbau mit den ICs und Abblockkondensatoren in SMD-Bauform. Bild 7 zeigt ein Fotos beider Platineseiten der Version RXTXv6.2 für 15m mit einer Zusatzplatine für einen Obertonoszillator im Bereich 84 MHz (84 MHz / 4 -> 21 MHz).

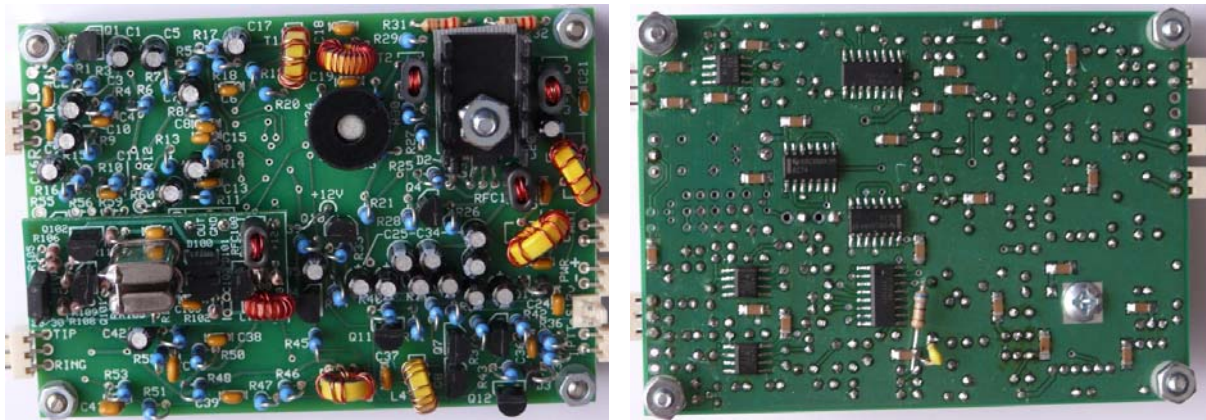


Bild 7: Platine des SoftRock RXTX v6.2 für 15m

Neben den Bausätzen von KB9YIG gibt es im Internet von Tasa, YU1LM, ausführliche Beschreibungen von SDR-Transceivern, die nur konventionelle Bauteile nutzen. Ich habe von Tasa Platinen für seinen Entwurf AVALA-01 erhalten und aufgebaut.

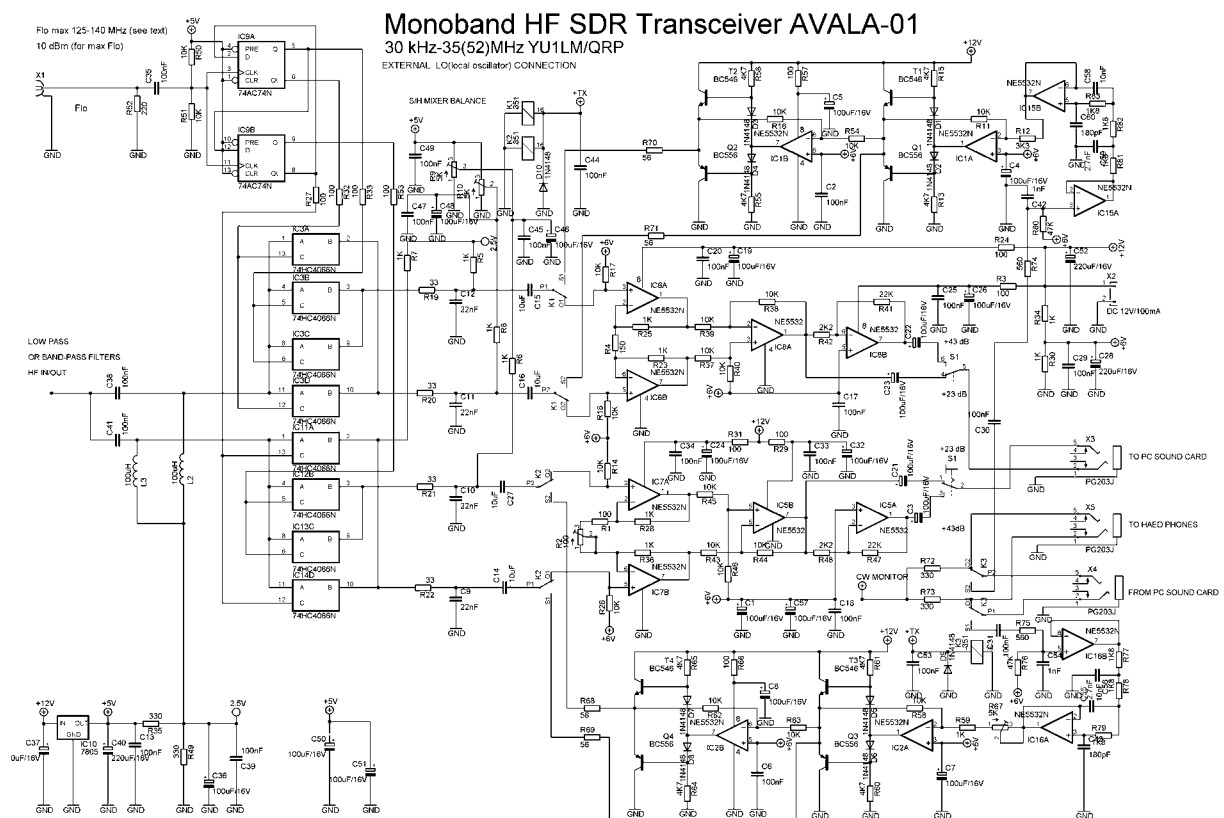


Bild 8: Schaltung von Tasa, YU1LM, ohne Treiber/PA des Sendezweiges

Im Schaltermischer werden hier die bekannten ICs SN74HC4066 eingesetzt. Grundsätzlich funktioniert dieser Entwurf im Kern ebenso ausgezeichnet. Nur der Schaltungsteil hinter dem Sendemischer mit Treiber/PA muss dringend überarbeitet wer-

den, um ein sauberes Ausgangssignal zu gewährleisten. Tasa hat das Problem erkannt.

Soweit die Vorstellung des Konzepts der einfachen SDR-Transceiver. Auf Schaltungseinzelheiten soll nicht eingegangen werden. Hier wird auf die unten zusammengestellten Literaturstellen und Links im Internet verwiesen.

Im Folgenden sollen nun die Eigenschaften des Empfängers und Senders beschrieben werden. Insbesondere werden Hinweise gegeben, die unbedingt zu beachten sind, um saubere Signale zu gewährleisten.

5. Anmerkungen zum Betrieb des Empfängers

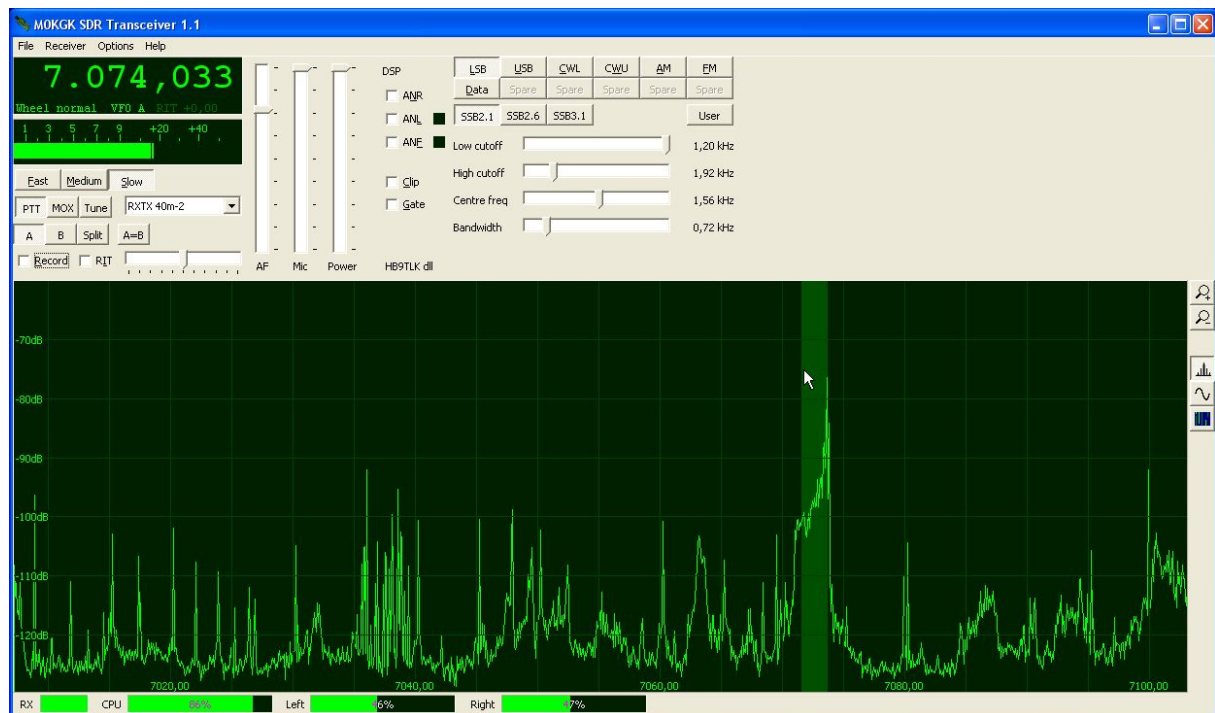
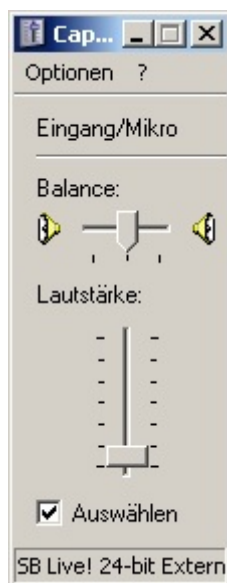


Bild 9: 40m Empfang mit dem Programm KGKSDR



Der kleine Empfänger bietet hervorragende Daten, die mit denen herkömmlicher Kurzwellen-Transceiver mithalten können. Überzeugend ist zusätzlich die hochauflösende spektrale Darstellung eines Bandbereiches. Diese ist kalibrierbar und gestattet eine Qualitätsbeurteilung von Empfangssignalen (Bild 9).

Um die Möglichkeiten der digitalen Signalverarbeitung aber voll nutzen zu können, sind einige Punkte zu beachten. Mit der Soundkarte und deren Konfiguration steht und fällt der Erfolg. Der Dynamikbereich des Empfängers wird festgelegt über die Einstellung des ADCs in der Soundkarte. Der Schieber des Soundkartenmixers wird soweit aufgezogen, das der Rauschhintergrund im Spektrum bei 50 Ohm Abschluss der Antennenbuchse gerade beginnt anzusteigen.

Bild 10: Einstellung der Empfindlichkeit der Soundkarte

Neben der Auflösung (16/24 Bits) und der Abtastrate der Soundkarte hat das integrierte Anti-Aliasing-TP-Filter Einfluss auf den Empfang in den Randbereichen. Starke Signale gerade außerhalb des ausgewerteten Bereiches $f_c \pm f_{abt}/2$ erzeugen aufgrund eines nicht idealen TP-Filters Phantom-Empfangssignale bei sogenannten Alias-Frequenzen f_a innerhalb:

$$f_a = f_e - f_{abt} \quad \text{für } f_e \text{ oberhalb des Frequenzbandes}$$

$$f_a = f_e + f_{abt} \quad \text{für } f_e \text{ unterhalb des Frequenzbandes}$$

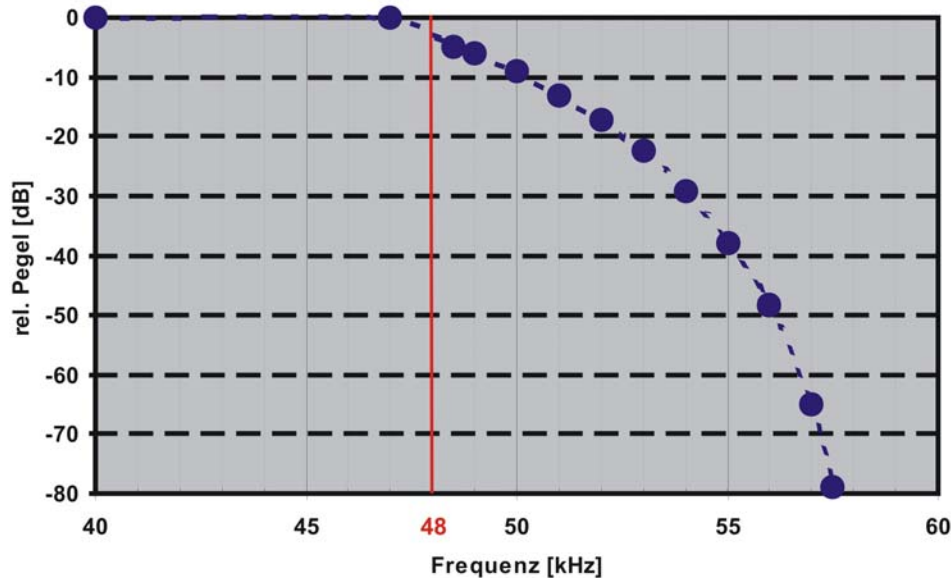
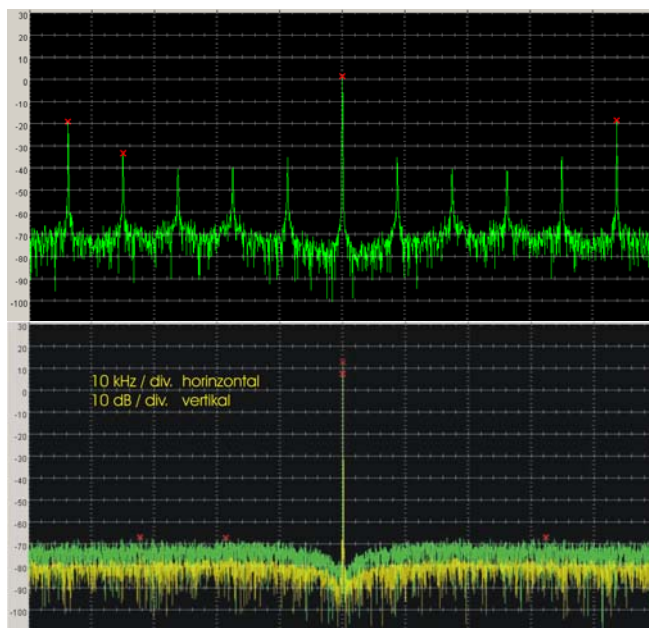


Bild 11: Anti-Aliasing Tiefpass in der Soundkarte 'Live! 24 Bit USB'

In den meisten Systemen wird als Generator für die Mischfrequenz ein Quarzoszillator eingesetzt. Der Wunsch nach einer höheren Flexibilität hat dazu geführt, dass von OMs andere Oszillatortypen eingesetzt werden. Es gibt es nun sehr gute, aber auch sehr schlechte Lösungen. Zunächst bieten sich DDS-Systeme an, hier sind die 'Spurious Signals' zu beachten. Während die neueste Generation von Analog Devices



sicherlich eine gute Lösung bietet, muss vor dem DDS-34B Baustein von JA7TDO dringend abgeraten werden. Das Spektrum dieses Oszillators (Bild 12o) sagt alles, Phantom-Signale sind nicht zu vermeiden.

Aber auch der Baustein CY27EE16 von Cypress, bekannt auch durch das 'Blueberry Board' der im 'ELEKTOR Empfänger' eingesetzt wird, bietet keine wirklich guten Daten. Sein Kennzeichen sind kräftige Rauschseitenbänder (Bild 12u), die mehr als 40dB über denen eines Quarzoszillators liegen. Wird ein solcher Oszillator eingesetzt, so verringert z.B. im 40m Band eine laute Rundfunkstation, die mit S9+40dB ankommt, die Empfindlichkeit in CW-Bereich um 3 S-Stufen.

Bild 12: Spektren des
 - des DDS-34B von JA7TDO
 - des Cypress CY27EE16

Als sehr gute flexible Lösung ist der neue programmierbare Oszillator Si570 zu empfehlen. Seine Eigenschaften sind vergleichbar mit denen eines Quarzoszillators. Für die Anwendung in SDR-Konzepten werden inzwischen kleine Baugruppen angeboten, XTALL mit einem PIC 12F683 (KB9YIG) und USB-Synthesizer Kit (FA-Shop).

Ein wichtiger Punkt für den Betrieb ist die Voraussetzung möglichst idealer I/Q-Signale. Aufgrund der Toleranzen in den Werten der Bauelemente in der Schaltung und der Soundkarte ist dies zunächst nicht erfüllt. Es besteht aber die Möglichkeit, in der digitalen Signalverarbeitung notwendige Korrekturen einzufügen. Die Korrekturdaten werden gewonnen, indem das Spiegelsignal einer lauten Station betrachtet und iterativ durch Änderung der Verstärkungs- und Phasenwerten minimiert wird. Über so erzeugte Tabellen werden Ausgleichsfunktion bestimmt. Mit den einbezogenen Korrekturdaten stehen dann für alle Frequenzen nahezu ideale I/Q-Signale zur Verfügung. Solche Algorithmen sind in den Programmen ROCKY und KGKSDR integriert. Ein Beispiel zeigt Bild 13 für das Programm Rocky.

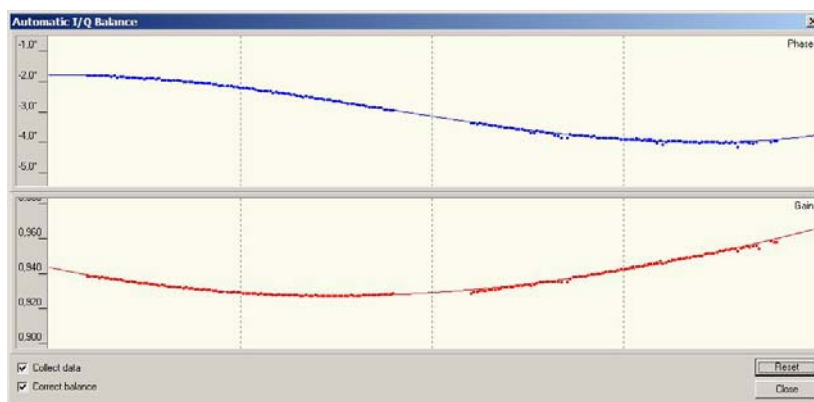


Bild 13: Automatisch generierte Korrekturwerte bei ROCKY

6. Anmerkungen zum Betrieb des Senders

Beim Empfang sind unsaubere Signale, Nebenwellenempfang und schlechte Seitenbandunterdrückung nur ein Problem für den Betreiber. Im Sendefall sieht alles ganz anders aus. Zum einen gibt es Vorschriften über Nebenwellenaussendungen, die unbedingt einzuhalten sind, zum anderen sind Störungen anderer Funkamateure auf dem Band zu vermeiden. Außerdem möchte man seinem QSO-Partner ein sauberes Signal anbieten.

Gerade auf der Sendeseite zeigt sich, dass es zwar möglich ist, mit einfachen Mitteln einen SDR-Sender aufzubauen und zu betreiben. Aber der Preis, der dafür zu entrichten ist, liegt aber in einem **notwendigen** Aufwand im Abgleich der Hard- und Software. Ohne diese sorgfältigen Arbeiten werden die Vorschriften mit ziemlicher Sicherheit verletzt und andere gestört. Meine Beobachtungen auf den Bändern zeigen, dass viele Nutzer sich dieser Notwendigkeit nicht bewusst sind.

So wie im Empfänger ist auch für den Sender ein Abgleich der I- und Q-Kanäle durchzuführen. Dies muss hier von Hand bewältigt werden. In einem Empfänger wird das Spiegelsignal abgehört (S-Meter) und über ein Menü in der genutzten Software werden Verstärkung und Phase so korrigiert, dass dieses Signal praktisch unterdrückt wird. Ein Spektrumanalyzer anstelle des Empfängers ist für diese Arbeiten ein hervorragendes Hilfsmittel. Über diese Korrekturen werden wiederum Korrekturfunktionen berechnet und abgelegt. Auf diese wird dann beim Sendebetrieb immer zurückgegriffen. Bild 14 zeigt ein Beispiel für den Abgleich. Die Trägerunterdrückung (Mitte) ist in diesem Fall auch noch zu verbessern.

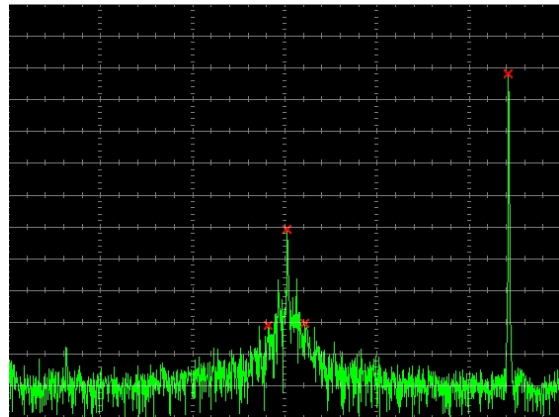
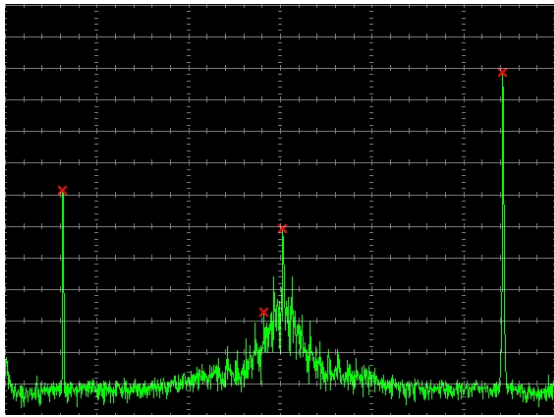


Bild 14: Spektren des Ausgangssignals, links ohne, rechts mit IQ-Abgleich

Viele OMs sind geneigt, ihre Geräte so einzustellen, dass die größte Leistung zur Antenne geht. Dies führt insbesondere bei den vielen Signalanteilen hinter dem Schaltermischer dann zu vielen IMD Produkten. Bild 15 zeigt dazu ein deutliches Beispiel. Es sind alles konkrete Linien im Spektrum, die auch mit einem Empfänger überwacht werden können. Oft werden unbedarft kleine PAs hinter einem SDR-Tx eingesetzt, die nicht genügend Linearität bieten. Solche Endstufen u.a. mit den billigen IRF510 Transistoren sind aber für Signale wie im Bild 15 verantwortlich.

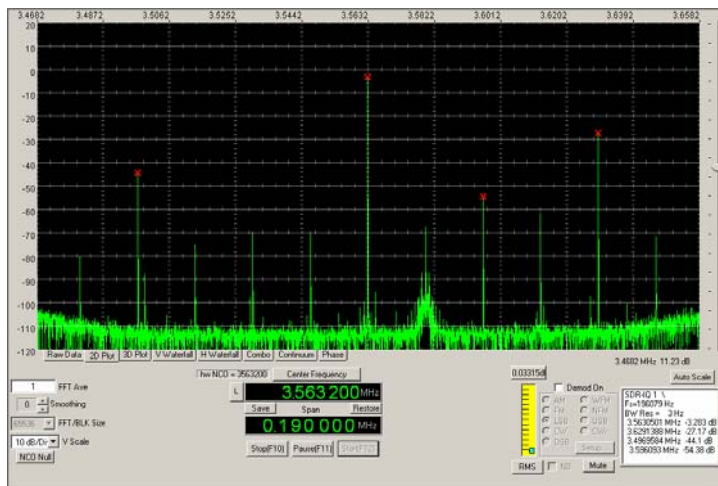


Bild 15: Ausgangsspektrum mit schlechter PA

Im Heft 7/2008 des FUNK-AMATEUR wird von DL2EWN eine QRP-PA beschrieben, die den hier notwendigen Anforderungen an die Linearität genügt. Im Bild 16 ist das Ausgangsspektrum eines SoftRock RXTX mit der PA von DL2EWN bei 5Watt PEP und Zweitton-Ansteuerung wiedergegeben. Die IMD Pegel liegen mehr als 42 db unterhalb PEP. Diese PA mit dem RD16HH1 will der FUNKAMATEUR als Bausatz anbieten. Auch von QRPPProject (DL2FI) wird eine geeignete PA mit einer Gegentaktstufe (2xRD16HHF1) angeboten.

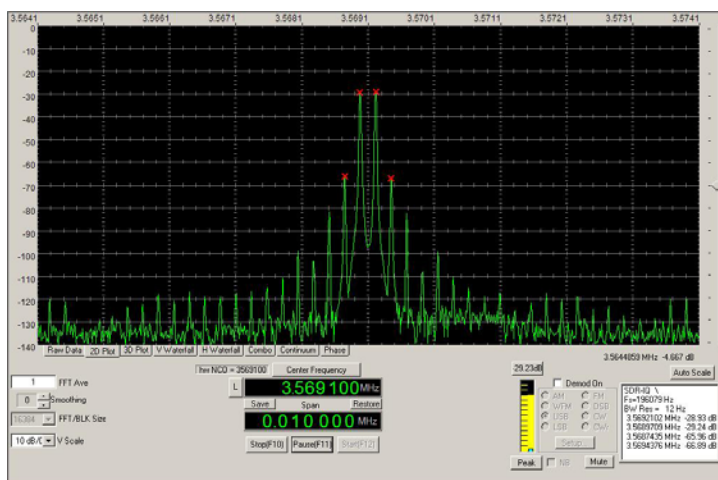


Bild 16: 5 Watt PEP und PA von DL2EWN

Auf die Bedeutung einer sauberen Mischfrequenz wird auch hier hingewiesen. Ein DDS-Baustein DDS-34B (Bild 12 oben) hätte verheerende Wirkung auf unerwünschte Nebenaussendungen.

Es folgt nun noch eine Betrachtung der Signale, die von der Soundkarte kommend zur Ansteuerung des QSE genutzt werden. Hinter dem DAC in der Soundkarte sieht das Spektrum wie im Bild 17 dargestellt aus. Um die Abtastfrequenz f_{abt} erscheinen die auszugebenden Frequenzen auch noch als Seitenbänder. Ein Tiefpassfilter soll idealerweise alle Anteile oberhalb der Frequenz $f_{\text{abt}}/2$ unterdrücken. Der reale Tiefpass lässt aber auch noch Anteile des unteren Seitenbandes durch. Soll die Soundkarte eine Frequenz f_S knapp unterhalb $f_{\text{abt}}/2$ ausgeben, so erscheinen am Ausgang zwei Signale mit den Frequenzen f_S und $f_{\text{abt}} - f_S$. Diese beiden Frequenzen erzeugen

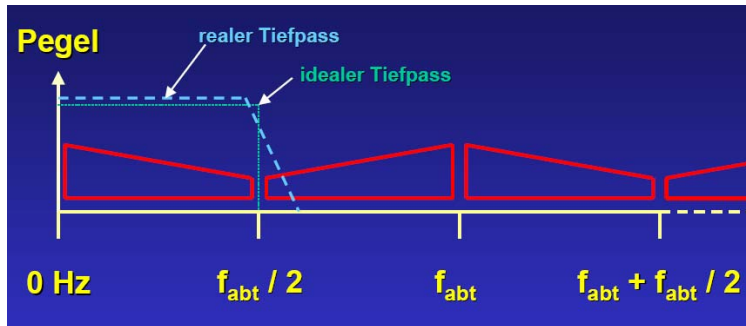


Bild 17: Ausgangsspektrum einer Soundkarte

nun im QSE zwei fast gleichstarke Sendesignale. Eine neue Messung verdeutlicht diese fatale Situation (Bild 18). Das unerwünschte Signal kann auch außerhalb der Amateurfunkfrequenzen den Funkbetrieb stören. Aufgrund der Phasenlage im unteren Seitenband erscheint auf der anderen Seite des Trägers/Mischfrequenz.

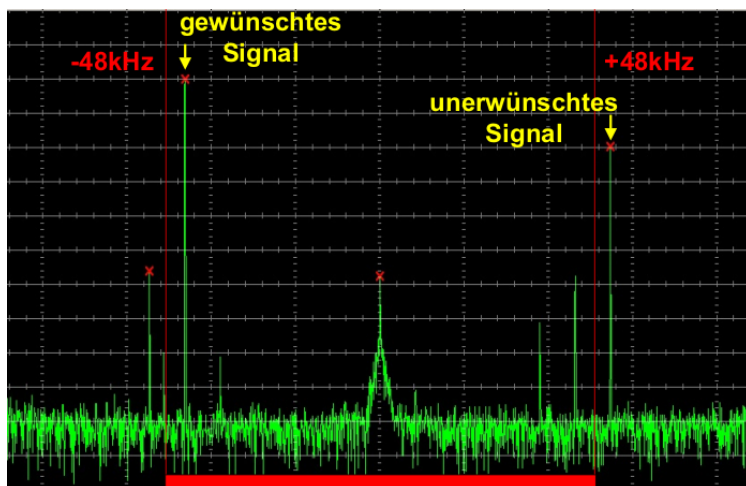


Bild 18: Sendebetrieb im Randbereich ist zu vermeiden

Als Konsequenz sind beim Sendebetrieb jeweils 4 bzw. 8 kHz entsprechend der Abtastrate der Soundkarte (48/96 kHz) in den Randbereichen zu meiden.

Werden alle Hinweise beachtet, so steht einem ungestörten bzw. nicht störenden Funkbetrieb nichts mehr im Wege. In Internetforen habe ich von FLEX-5000 Besitzern die Bemerkung gelesen, dass ein SoftRock RXTX etwa 80% der Leistung eines FLEX-5000 bietet.

7. Literatur und interessante Internethinweise

SoftRock – Einstiegsplattform für softwaredefiniertes Radio

Bodo Scholz, DJ9CS; FUNKAMATEUR Heft 6/2006 S. 665 und Heft 7/2006 S. 792

SoftRock RXTXv6.1: Ein softwaredefinierter QRP-Transceiver

Thomas Baier, DG8SAQ; Bodo Scholz, DJ9CS; FUNKAMATEUR Heft 6/2007 S. 608

Einfache Selbstbaukonzepte für SDR-Transceiver

Bodo Scholz, DJ9CS; CQDLspecial, 'SDR & D-Star' 2008, S. 4

Programme für einfache SDR-Transceiver

Bodo Scholz, DJ9CS; CQDLspecial, 'SDR & D-Star' 2008, S. 10

Welcher Oszillator in einem SDR-Modul?

Bodo Scholz, DJ9CS; CQDLspecial, 'SDR & D-Star' 2008, S. 44

Breitbandige KW-Linearendstufe mit HF-Leistungs-MOSFET

Harald Arnold, DL2EWN; FUNKAMATEUR Heft 7/2008 S. 741

Minimalistischer hochwertiger Synthesizer mit USB-Steuerung

Thomas Baier, DG8SAQ; FUNKAMATEUR Heft 6/2008 S. 622

Informationen zu allen SoftRock Projekten:

- Internetseiten DJ9CS : <http://softrock.raisdorf.org>
<http://dj9cs.raisdorf.org>
- YAHOO Group 'Softrock40' : <http://groups.yahoo.com/group/softrock40/>
- SDR-Projekte von YU1LM : <http://yu1lm.qrpradio.com/>
<http://www.sdrforum.de/viewforum.php?f=6>
- SI570 Projekte : <http://www.mydarc.de/dg8saq/SI570/>
<http://www.sdr-kits.net/>
<http://www.box73.de/catalog/index.php>
<http://softrock.raisdorf.org/XTALL.html>

Programme zum Betrieb einfacher SDR-Transceiver:

- **Rocky** von VE3NEA : <http://www.dxatlas.com/Rocky/>
- **KGKSDR** von M0KGK : <http://www.m0kgk.co.uk/>
- **PowerSDR-sr40'** : <http://powersdr-sr40.sourceforge.net/>
- Informationen zu PowerSDR : <http://www.flex-radio.com/>
- QRP-PA-2008 von QRPproject : <http://www.qrpproject.de/QRPPA2008.html>
- SDR-1000 und FLEX-5000 : <http://www.flex-radio.com/>
- ADAT-200A : <http://www.adat.ch/>